



Pedro Miguel Silva Dias

Licenciado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Isolador de travessia para Alta Tensão: melhoria do seu projecto usando um programa de elementos finitos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Orientador: Mário Fernando da Silva Ventim Neves,
Prof. Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Carlos da Palma Goes

Arguente: Mestre David José da Rocha Domingues

Vogal: Prof. Doutor Mário Fernando da Silva Ventim Neves



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2012

Isolador de travessia para Alta Tensão: melhoria do seu projecto usando um programa de elementos finitos

Copyright ©2012 Pedro Miguel Silva Dias

Faculdade Ciências e Tecnologia

Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpetuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua copia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado credito ao autor e editor.

Agradecimentos

Quero agradecer ao Engenheiro David Domingues que me permitiu desenvolver este trabalho, através dos esclarecimentos e apoio prestados ao longo de todo o projecto. Um agradecimento á empresa Indisol que permitiu o fabrico e o ensaio de alguns isoladores, sem esta ajuda não seria possível a concretização deste trabalho.

Agradeço ao professor Mário Ventim Neves, meu orientador, que sempre mostrou disponibilidade para qualquer esclarecimento, orientando e ajudando na concretização deste trabalho. Ao Engenheiro David Inácio, pela ajuda no Flux2D e pela sua opinião, bastante importante, em diversos pontos deste trabalho.

Um agradecimentos especial aos meus colegas e amigos que estiveram presentes ao longo deste tempo, pela companhia, força, aconselhamento e pelos tempos livres que também foram importantes.

Aos meus pais, que ficarei para sempre agradecido pela possibilidade e pelas condições que me deram para chegar a este ponto da minha formação, e pelo apoio incondicional dado. Por fim á minha irmã, que apesar de ainda ser pequena é bastante importante.

Resumo

Hoje em dia os testes de descargas parciais nos isoladores de alta-tensão têm um papel bastante importante ao garantir a fiabilidade durante o seu funcionamento assim como a qualidade de fabrico.

Foi proposta a melhoria de um isolador de travessia previamente projectado. Este isolador tem uma *interface* onde é encaixado um conector separável que faz a ligação eléctrica entre o condutor e o isolador de travessia.

O objectivo dessa melhoria seria a redução de descargas parciais nas zonas envolventes aos grampos. Foram feitas simulações do modelo base, assim como dos modelos propostos, através do Flux2D, um *software* de simulação por elementos finitos. Através destas simulações foi possível identificar zonas críticas de concentração de campo eléctrico no isolador, permitindo assim a proposta e simulação de algumas soluções. Com as simulações propostas é possível aumentar a tensão limiar permitindo ao isolador o seu funcionamento com valores de tensão mais elevados e consequentemente aumentando o seu tempo útil de vida. Algumas das soluções foram fabricadas, permitindo posteriormente o seu ensaio, onde foi feita uma análise e interpretação de modo a confirmar a melhoria do modelo final.

Palavras-Chave: Descargas Parciais, Alta-Tensão, Isolador de Travessia, Conector Separável, Zonas Críticas, Tensão Limiar

Abstract

Nowadays the tests about partial discharges in high-voltage insulators have an important role ensuring reliability in their function and manufacturing quality.

Previously an enhancement was proposed of the bushing project. This insulator has an interface in which a separable connector is plugged in, making the electrical connection between the high-voltage cable and the bushing.

The goal of such improvements would be the reduction of partial discharges in the zone near the inserts. Simulations of the base model and the proposed models were made through Flux2d, a finite element software. Through these simulations it was possible to identify critical zones of electric field concentration in the bushing, facilitating the proposal and simulation of some solutions. With the proposed solutions it's possible to increase the inception voltage in the bushing, allowing the operation with increased voltage therefore improving the useful life of the bushing. Some solutions were built and tested, then an analysis and interpretation were made endorsing the enhancement of the final model.

Keywords: Partial Discharge, High-Voltage, Bushing, Separable Connector, Critical Zones, Inception Voltage.

Acrónimos e Símbolos

DP - *Descarga Parcial*

EPDM - *Ethylene propylene diene monomer*

E_a - Campo eléctrico aplicado ao dieléctrico

E_l - Campo eléctrico local

E_d - Campo eléctrico de disrupção

E_{lim} - Campo eléctrico limiar

E_{ext} - Campo eléctrico de extinção

E_q - Campo gerado pelas cargas superficiais e espaciais

U_{lim} - Tensão limiar

U_{ext} - Tensão de extinção

U_d - Tensão de disrupção pela curva de Paschen

U_0 - Tensão aplicada aos eléctrodos

τ_s - Tempo estatístico de atraso

ΔU - Sobretenção

$P(t)$ - Função de probabilidade de ocorrência de DP no tempo

C_k - Capacidade do condensador de acoplamento

Z_m - Impedância de medida

Z - Filtro ou impedância

A - Amostra

K_c - Factor de calibração

q_i - Amplitude da descarga

φ_i - Fase da descarga

Conteúdo

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Abreviaturas e Símbolos	xi
Conteúdo	xii
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
1 Introdução	1
1.1 Visão geral	1
1.2 Estado de Arte	2
1.3 A Empresa	4
1.4 Motivação	5
1.5 Estrutura	5
2 Princípios Gerais	7
2.1 Materiais isolantes sólidos	7
2.1.1 Resina Epoxídica	7
2.1.2 Resina Epoxídica cicloalifática	8
2.2 Definição e Classificação de Descargas Parciais	8
2.3 Condições para ocorrência de Descargas Parciais	10
2.4 Degradação causada por Descargas Parciais	13
3 Detecção, medida e análise de Descargas Parciais	15
3.1 Circuito de detecção	15
3.2 Técnicas de Medida de DP	17
3.2.1 Medida de Descargas Parciais com Resolução Temporal	18

3.2.2	Medida de Descargas Parciais com Resolução em Ângulo de Fase	18
3.3	Análise de Descargas Parciais	20
4	Simulações e Modelos Propostos	23
4.1	Isolador em estudo	23
4.2	Projecto Flux2D	24
4.3	Simulações	26
4.3.1	Isolador base	26
4.3.2	Isolador com grampos curvados	29
4.3.3	Isolador com ecrã interno	30
4.3.4	Isolador com ecrã interno recuado	33
4.4	Resumo das simulações	35
5	Ensaaios e análise de resultados	37
5.1	Calibração do isolador	38
5.2	Ensaaios dos isoladores	39
5.2.1	Isolador base	39
5.2.2	Isolador com anel condutor	42
5.2.3	Isolador com anel e grampos curvados	43
5.2.4	Isolador com anel, grampos curvados e terminal	45
5.2.5	Isolador com anel, grampos curvados e terminal embebidos em silicone líquido	46
5.2.6	Isolador com ecrã interno recuado e terminal	47
5.3	Resumo dos Ensaaios	50
6	Conclusão	51
	Bibliografia	53
	Anexo	57

Lista de Figuras

1.1	Isoladores de travessia ar-gás. (Fonte de: [14])	3
1.2	Equipa da Indisol	4
1.3	Meios de ensaios da Indisol	5
2.1	Grupo <i>epoxy</i>	8
2.2	Tipos de descargas parciais: (a) superficial, (b) efeito coroa, (c) interna, (d) arborescência eléctrica. (Fonte de: [24])	9
2.3	Ocorrência de descargas parciais em tensão alternada. (Adaptado de: [5])	11
2.4	Curva de Paschen para o ar. (Fonte de: [24])	12
2.5	Relação entre o tempo estatístico de atraso τ_s e a sobretensão ΔU . (Adaptado de: [29])	13
2.6	Esquema simplificado do processo de degradação do polímero. (Adaptado de: [29]) .	13
3.1	Esquema do circuito de detecção de DP usado. (Adaptado de: [16])	16
3.2	Método de calibração. (Adaptado de: [4])	17
3.3	Forma de onda do pulso de descarga. (Fonte de: [9])	18
3.4	Diagrama esquemático das medidas básicas de descarga. (Fonte de: [21])	19
3.5	Padrões normais de descarga com resolução em ângulo de fase dos defeitos típicos no isolamento. (1) descarga efeito coroa, (2) descarga superficial, (3) descarga em cavidades, (4) descarga em arborescência eléctrica, (5) descarga em componentes flutuantes, (6) ruído por mau contacto. (Editado de: [20])	21
4.1	Isolador de travessia em estudo	23
4.2	Modelo do isolador de travessia estudado	24
4.3	Desenho no Flux2D do isolador base	25
4.4	Desenho no Flux2D do isolador base com malha de simulação	26
4.5	Linhas equipotenciais do isolador base	27
4.6	Evolução do campo eléctrico na zona exterior dos grampos	27

4.7	Caminho superior e evolução do campo eléctrico no isolador base	28
4.8	Caminho inferior e evolução do campo eléctrico no isolador base	28
4.9	Linhas equipotenciais do isolador com grampos curvados	29
4.10	Caminho superior e evolução do campo eléctrico no isolador com grampos curvados	30
4.11	Caminho inferior e evolução do campo eléctrico no isolador com grampos curvados .	30
4.12	Linhas equipotenciais do isolador com ecrã interno	31
4.13	Caminho superior e evolução do campo eléctrico no isolador com ecrã interno	31
4.14	Caminho inferior e evolução do campo eléctrico no isolador com ecrã interno	32
4.15	Caminho e evolução do campo eléctrico ao longo da brecha entre o conector e a base do isolador	32
4.16	Linhas equipotenciais do isolador com ecrã interno recuado	33
4.17	Caminho inferior e evolução do campo eléctrico no isolador com ecrã interno	34
5.1	Isolador travessia com conector separável	37
5.2	Gaiola de Faraday para ensaio de DPs	38
5.3	Calibração do isolador	39
5.4	Ensaio de DPs em isolador base	40
5.5	Padrão de descargas parciais em isolador base com $U_{rms} = 20kV$	41
5.6	Ensaio de DPs em isolador com anel	42
5.7	Isolador com grampos curvados durante o seu fabrico	43
5.8	Radiografia do isolador com grampos curvados	44
5.9	Montagem para ensaio do isolador com anel, grampos curvados e conector	45
5.10	Padrão de descargas parciais em isolador com anel, grampos curvados e conector com $V_{rms} = 15kV$	46
5.11	Novo ecrã interno recuado	47
5.12	Radiografia do isolador com ecrã interno recuado	48
5.13	Distribuição do campo eléctrico no isolador com ecrã interno recuado	49

Lista de Tabelas

1.1	Características das várias interfaces do conector. Fonte: [15]	4
4.1	Distribuição das linhas equipotenciais das várias simulações	35
5.1	Medições do ensaio do isolador base	40
5.2	Medições do ensaio do isolador com anel	43
5.3	Medições do ensaio do isolador com anel e grampos curvados	44
5.4	Medições do ensaio do isolador com anel, grampos curvados e conector	45
5.5	Medições do ensaio do isolador com anel, grampos curvados e manga embebidos em silicone líquido	47
5.6	Medições do ensaio do isolador com ecrã interno recuado e terminal	49
5.7	Valores de tensão limiar obtidos nos vários ensaios	50

Capítulo 1

Introdução

1.1 Visão geral

O isolamento eléctrico é uma parte muito importante dos componentes de alta tensão, sendo responsável pela fiabilidade de diversos equipamentos eléctricos utilizados na geração, transmissão e distribuição de energia eléctrica.

Este isolamento eléctrico é feito através de isoladores, que não são mais do que peças feitas de um material isolante sólido, que se interpõe entre condutores activos, ou entre estes e a massa, não permitindo a passagem de corrente.

Existem portanto, os isoladores de apoio que têm como principal função o suporte dos condutores e os isoladores de travessia que são usados quando um condutor precisa de atravessar uma divisória entre dois meios que se querem manter separados, que pode ser o atravessamento para o interior de um posto de transformação ou de uma subestação, ou a travessia para o interior de um transformador a óleo ou de um disjuntor [30].

Aos isoladores transmitem-se forças gravíticas e electrodinâmicas que actuam sobre os condutores. Por isso os isoladores devem ser capazes de suportar a fadiga eléctrica resultante da tensão aplicada, a fadiga mecânica resultante das forças que lhes são transmitidas pelos condutores, fadiga térmica devido ao aquecimento do isolador devido ao seu funcionamento e fadiga ambiental que corrói a contamina o material isolante. Grande parte das dificuldades que se revelam no uso dos isoladores resultam do seu comportamento no exterior, onde a resistividade do material isolante é posta em causa devido às condições ambientais [30][9].

Os materiais isolantes poliméricos tem sido amplamente usados nos componentes de alta tensão, vindo a substituir o vidro e a porcelana. Estes materiais poliméricos têm um peso mais reduzido e alguns materiais apresentam propriedades hidrofóbicas que permitem ter um melhor comportamento no exterior sob condições ambientais adversas, como por exemplo meios com

salinidade elevada ou poluição [22].

Devido ao envelhecimento originado pelos factores atrás referenciados, ou para detectar defeitos que possam ter sido causados no isolamento durante o seu processo de fabricação, a detecção e medição de descargas parciais (DPs) torna-se fundamental [8].

Uma descarga parcial não é mais que uma descarga eléctrica que ocorre entre dois pontos não ligando directamente os eléctrodos, sendo consideradas assim descargas incompletas. Existem vários tipos que descargas que serão abordadas e faladas detalhadamente mais á frente.

Assim, para que seja feita uma boa interpretação dos resultados de DPs de uma amostra deve-se ter em conta alguns aspectos essenciais, como: as características dos impulsos da descarga parcial (DP), como a sua polaridade, amplitude, frequência de ocorrência e a sua relação com o ângulo de fase da tensão aplicada; ter conhecimento sobre a estrutura de isolamento, como as zonas de campo eléctrico máximo que são mais favoráveis à ocorrência de DPs; ter modelos que permitam relacionar os sinais DP medidos com determinados tipos de defeitos [18].

Para que as zonas críticas de concentração de campo eléctrico sejam detectadas e analisadas durante o projecto do isolador, torna-se útil o uso de um *software* de simulação. Na presente dissertação foi utilizado o Flux2D¹. Existem outras soluções de *software* mais completas para o projecto de isoladores, como o COULOMB². Este *software* além de simular a intensidade do campo eléctrico como o Flux2D, também simula a capacidade dos isoladores, forças a que estão sujeitos, influência das condições ambientais na distribuição das linhas de campo eléctrico, entre outras características sendo um *software* mais apropriado para o projecto de isoladores.

Assim, com o auxílio de um *software* de simulação torna-se mais fácil o projecto de um isolador ou simplesmente a melhoria ou análise das suas zonas críticas.

1.2 Estado de Arte

Os isoladores de travessia são usados para fazer a ligação eléctrica entre dois meios separados por uma parede. Podem ser usados em transformadores, motores, caixas de aparelhagem, etc. A ligação entre os dois meios pode ser do tipo ar-ar, ar-óleo, ar-gás, óleo-óleo ou óleo-gás, onde o gás usado é hexafluoreto de enxofre, SF_6 .

¹Flux2D é uma aplicação de software de elementos finitos usada para simulações electromagnéticas, desenvolvido pela empresa Cedrat. Fonte: [7]

²COULOMB é um software de projecto e análise de campo eléctrico em 3D, desenvolvido pela empresa Integrated. Fonte: [32]

Existem vários tipos diferentes de isoladores de travessia, seguindo a norma IEC137, classificados segundo as estruturas que os compõem, sendo as principais as seguintes:

1. Compósito - Um isolador de travessia onde o material isolante é composto por duas ou mais camadas coaxiais de diferentes materiais isolantes;
2. Condensador - Um isolador de travessia onde camadas cilíndricas condutoras são dispostas de forma coaxial dentro do material isolante. O comprimento e o diâmetro dos cilindros são projectados de maneira a controlar a distribuição do campo eléctrico dentro e fora da superfície do isolador. Alguns exemplos deste tipo de isolador são feitos de resina com papel isolante ou óleo embebido em papel isolante, entre outros;
3. Com óleo - Um isolador de travessia onde no espaço entre o condutor e o isolante sólido é preenchido com óleo de isolamento;
4. Sólido - Um isolador de travessia que é composto por apenas um material, como por exemplo cerâmica [2].

No presente trabalho foi usado um isolador de travessia sólido, composto apenas por resina epoxídica cicloalifática. É possível visualizar na figura 1.1 exemplos de isoladores de travessia ar-gás.



Figura 1.1: Isoladores de travessia ar-gás. (Fonte de: [14])

Existem várias *interfaces* padrão, que são as várias geometrias diferentes que fazem a ligação dos condutores do isolador e conector, definindo os isoladores de travessia, desde *interface A* até *E*. Além das diferenças de dimensões e medidas específicas que cada interface possui, existem outras diferenças como a secção do cabo condutor, a corrente máxima transportada e tensão

de funcionamento. Para cada *interface* existem os conectores apropriados, seguindo as normas internacionais IEEE386 e IEEE404, CENELEC EN50180/50181 e IEC137.

As características das várias *interfaces* dos conectores foram resumidas e podem ser visualizadas na tabela 1.1, tendo sido retiradas da página da *Euromold* [15].

	<i>Interface A</i>	<i>Interface B</i>	<i>Interface C</i>	<i>Interface D</i>	<i>Interface E</i>
Tensão máxima (kV)	24	36	36	24	36
Corrente máxima (A)	250	400	630/1250	800/1250	800/1250
Secção máxima cabo (mm^2)	150	300	300/630	790	790

Tabela 1.1: Características das várias interfaces do conector. Fonte: [15]

1.3 A Empresa

Este trabalho foi feito em parceria com a empresa Indisol, dedicada à concepção, desenvolvimento e industrialização de isoladores eléctricos e soluções isolantes.

Foi através da fabricação dos isoladores projectados e dos meios de ensaio disponibilizados pela Indisol que este trabalho foi possível.

Fazendo uma breve descrição da empresa, esta usa resinas epoxy como material para o isolamento eléctrico, sendo este material responsável pelas funções mecânicas e eléctricas, capaz de encapsular componentes. São então produzidas resinas aromáticas para aplicações interiores para baixa, média e alta tensão. Também são produzidos sistemas cicloalifáticos carregados com sílica pré tratada para aplicações de uso à intempérie e sistemas especiais desenvolvidos segundo *performance* eléctrica, térmica e mecânica especificada.

A Indisol possui também meios de caracterização e ensaio onde são feitos ensaios para detecção de descargas parciais com uma tensão máxima de 75 kV, meios para medição de resistência de contacto, resistência mecânica, ciclos térmicos, estanquidade a hélio, radioscopia de raios-X, calorimetria diferencial de varrimento, reologia e densidade.



Figura 1.2: Equipa da Indisol



Figura 1.3: Meios de ensaios da Indisol

1.4 Motivação

Esta tese de mestrado surge através de uma proposta de melhoria de um isolador de travessia feita pela empresa Indisol. O isolador em questão foi um projecto específico que teve a necessidade de ser adaptado em termos de dimensões. Este isolador, de modo a ser compatível com uma *interface A*, foi fabricado para uma tensão de funcionamento entre 8 e 10 kV. Posteriormente, foi necessário o seu funcionamento a uma tensão mais elevada, o que originou problemas com descargas parciais.

Assim sendo, o objectivo será a melhoria da estrutura do isolador, ensaiando várias propostas de modo a suportar uma tensão de funcionamento mais elevada sem que se originem descargas parciais que comprometam o sistema de isolamento e a fiabilidade do mesmo.

1.5 Estrutura

A presente dissertação é composta por 6 capítulos. O capítulo 1 apresenta de forma geral o trabalho, dá uma visão geral sobre os sistemas de isolamento eléctrico e descargas parciais que podem ocorrer nesses mesmos sistemas. Também são abordadas de forma breve as características dos impulsos de descargas, assim como a importância da utilização de um *software* no projecto de isoladores. No capítulo 2 são apresentadas as principais características dos materiais usados para o tipo de isolador estudado, assim como os princípios gerais sobre descargas parciais, incluindo definição, classificação e condições necessárias para a ocorrência das descargas. O capítulo 3 aborda os princípios de detecção e técnicas de medida, análise e interpretação de descargas parciais. No capítulo 4 são feitas as simulações no Flux2D de várias propostas de melhoria do isolador em estudo de modo a chegar a uma solução final. No capítulo 5 foram ensaiados os vários isoladores fabricados, de modo a confirmar os resultados obtidos nas simulações, assim como a proposta final. O capítulo 6 apresenta as conclusões referentes ao trabalho efectuado.

Capítulo 2

Princípios Gerais

2.1 Materiais isolantes sólidos

Vários tipos de materiais sólidos são usados no isolamento de equipamentos eléctricos, dos quais a resina epoxídica que é habitualmente usada em isoladores em espaços interiores e a resina epoxídica cicloalifática usada em espaços exteriores devido à sua capacidade de evitar a degradação sob condições ambientais. No restante trabalho, a resina epoxídica irá ser referida como *epoxy*.

2.1.1 Resina Epoxídica

O *epoxy* é considerado um material indispensável para os sistemas de isolamento, devido à sua capacidade de se ligar a outros materiais, como o ecrã interno estudado neste trabalho, capacidade de isolamento eléctrico e excelente resistência química e mecânica. É um material versátil, estável sob condições adversas e facilmente utilizável trazendo uma significativa melhoria nos equipamentos eléctricos. Geralmente é usado em transformadores, geradores e transformadores a óleo, e na moldagem de componentes eléctricos como isoladores [34][17].

A química da resina *epoxy* é baseada em reacções de um anel de três membros, dois carbonos e um átomo de oxigénio, conhecido como o grupo oxirano ou grupo *epoxy*, figura 2.1. Esta resina é um material viscoso, contendo aneis *epoxy* destinados à polimerização. A resina é normalmente combinada com outros componentes para alcançar as propriedades desejadas no polímero final. Este ponto torna-se fulcral pois qualquer mudança pode afectar a taxa de uma reacção química afectando as suas propriedades finais. Após a cura, processo de transformação de um líquido num sólido, o material torna-se um polímero *epoxy*. Este processo é irreversível [6].

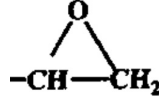


Figura 2.1: Grupo *epoxy*

2.1.2 Resina Epoxídica cicloalifática

A Resina Epoxídica Cicloalifática é usada devido à sua versatilidade e estabilidade sob condições ambientais, não formando um resíduo virtual condutor quando se dá a ocorrência de DPs, sendo habitualmente usado em isolamento eléctrico exterior [19]. Além de melhorias no suporte das condições ambientais, também é mais resistente à humidade, à radiação ultravioleta e tem uma melhor resistência química. A formação do resíduo virtual é evitada devido à pirólise de cicloalifáticos do isolador de *epoxy*, que produz sub-produtos gasosos como vapor de água e dióxido de carbono. A alta temperatura do arco decompõe pequenas quantidades de água no *epoxy* cicloalifático, que são libertadas em forma de vapor ao longo do caminho do arco. [23][19].

2.2 Definição e Classificação de Descargas Parciais

Como já foi referido no capítulo introdutório, uma descarga parcial é uma descarga que afecta apenas porção do dieléctrico, não ligando directamente os eléctrodos de forma completa [10]. O conceito de descargas incompletas dá-se pela restrição quanto à zona do dieléctrico. Estas descargas são também rápidas e intermitentes. As DPs ocorrem em regiões definidas e não chegam a completar um circuito fechado (curto-circuito). São também consideradas rápidas por ocorrerem num curto espaço de tempo, quando comparado com o período da tensão de alimentação. O tempo de duração de uma DP é de aproximadamente alguns nano segundos, o que as caracteriza como um fenómeno de alta frequência [16].

As descargas parciais podem ser divididas em três categorias, diferenciando-se pelo local de origem da descarga. Um desses tipos de descargas são as descargas superficiais, que ocorrem na superfície do dieléctrico, devido a um valor de campo eléctrico bastante elevado. Podem ocorrer em gases e líquidos, sendo mais provável acontecer em gases pela sua maior permissividade eléctrica relativamente aos líquidos. Quando são usados líquidos a envolver o dieléctrico, pode haver a formação de bolhas de ar que aumentam a permissividade do meio envolvente. Este aspecto é bastante importante, pois num dos ensaios deste trabalho foi usado um líquido envolvendo o dieléctrico [20][26].

Outro tipo de descarga é a descarga de efeito coroa. Esta ocorre normalmente junto a condutores, quando não existe uma boa ligação entre estes e o material dieléctrico. Assim, quando a intensidade do campo eléctrico é bastante elevada origina-se a disrupção ionizando parcialmente essa região. Esta descarga pode ser detectada visualmente e auditivamente. O condutor fica assim envolvido numa zona de gás ionizado, permitindo a ocorrência de mais descargas que levam à oxidação do dieléctrico. Este tipo de descargas pode ocorrer junto aos grampos do isolador, que será o estudo deste trabalho [24][26].

Por fim as descargas internas, que ocorrem no dieléctrico devido à existência de micro cavidades preenchidas com gás ou devido à sua heterogeneidade. Em alguns tipos de isoladores, que são fabricados com várias camadas de material dieléctrico, podem surgir este tipo de descargas quando a ligação entre as camadas não é perfeita. No caso do isolador em estudo, pode haver a formação de cavidades se não for aplicada uma pressão suficiente no *epoxy*, durante a sua moldagem. O processo de formação de uma DP é semelhante ao tipo de descarga referido anteriormente, havendo a disrupção do gás contido na cavidade, seguindo-se da ocorrência de descargas parciais [13][5].

Como consequência da ocorrência frequente de várias DPs internas numa cavidade dá-se a formação de arborescências eléctricas (*treeing*). As arborescências eléctricas são cavidades em forma de canais, paralelos ao campo eléctrico aplicado, que resultam da oxidação do dieléctrico apresentando a forma de uma árvore [13].

A figura 2.2 apresenta de forma ilustrativa as três categorias de descargas parciais: superficial, efeito coroa e interna que podem ocorrer em sistemas de isolamento.

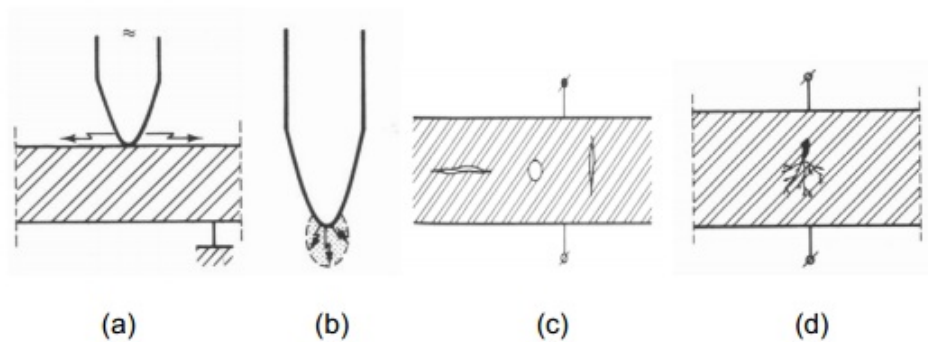


Figura 2.2: Tipos de descargas parciais: (a) superficial, (b) efeito coroa, (c) interna, (d) arborescência eléctrica. (Fonte de: [24])

Todos estes tipos de descargas levam à oxidação do dieléctrico, reduzindo a capacidade de isolamento, originando a falha do isolador.

2.3 Condições para ocorrência de Descargas Parciais

Numa fase inicial, quando ainda não houve ocorrência de nenhuma DP o campo eléctrico local (E_l) é uniforme em todos os pontos da cavidade e varia proporcionalmente com a tensão aplicada.

Quando o valor de E_l atingir ou ultrapassar o valor do campo eléctrico de disrupção (E_d), poderão originar-se DPs. Atingido este valor de campo dá-se início ao processo de avalanche que irá ser descrito seguidamente. Existe também, um valor de campo limiar (E_{lim}) que define o início da ocorrência de DPs e um campo de extinção (E_{ext}), que define o fim da ocorrência de DPs.

Atingido E_d , terá que existir um electrão inicial, designado como electrão-germen ou electrão-mãe. Estes electrões podem surgir através da radiação cósmica ou serem arrancados da superfície interna da cavidade, originando cargas livres na cavidade.

Os electrões que têm origem no material dieléctrico libertam-se devido ao campo eléctrico aplicado que exerce uma força nos electrões da camada mais externa dos átomos do dieléctrico, arrancando-os da sua camada de valência.

Libertados os primeiros electrões, estes são acelerados entre as duas extremidades opostas da cavidade, no sentido contrário do campo eléctrico aplicado. Ao serem acelerados, estes electrões irão colidir com as moléculas do gás da cavidade ionizando-as. Desta colisão entre um electrão e uma molécula neutra, resultam dois electrões e um ião positivo. O electrão original, mais o recém libertado, vão repetir o processo mais adiante, e assim sucessivamente, aumentando significativamente o número de partículas na cavidade. Este conjunto de cargas geradas constitui uma avalanche, daí o seu nome de teoria da avalanche ou de Townsend.

Devido à massa dos iões positivos ser bastante superior à dos electrões, os iões deslocam-se com uma velocidade inferior relativamente aos electrões. Daí as cargas negativas distribuírem-se na cavidade junto à parede de potencial superior e as cargas positivas no meio da cavidade e junto á parede de potencial inferior. Esta explicação serve de base para a teoria dos filamentos, que explica a descarga que se dá pela conversão do volume ocupado pelas cargas espaciais desenvolvidas na primeira avalanche num canal de plasma. A condução de electrões através desse canal faz com que E_l seja reduzido, até que este seja suficientemente baixo para não suportar o canal, extinguindo-se [30].

O campo local passa a ser a soma do campo total (E_0) devido à tensão aplicada aos eléctrodos (U_0) e do campo gerado pelas cargas superficiais e espaciais (E_q), $E_l = E_0 + E_q$. Assim, sempre que E_l atingir E_r irá ocorrer uma nova descarga. Um valor elevado de E_q pode então ser suficiente para originar uma descarga, mesmo com um valor de E_0 reduzido ou nulo. O processo de descarga passa então a ser controlado por E_l e não por E_0 . Todo este processo pode ser visto na figura 2.3 onde a onda sinusoidal representa E_0 e as ondas triangulares representam E_l [5].

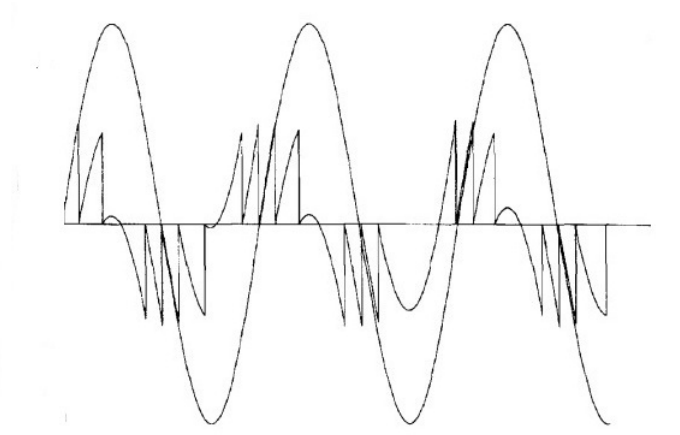


Figura 2.3: Ocorrência de descargas parciais em tensão alternada. (Adaptado de: [5])

Como já foi referido anteriormente, para que ocorra uma DP, E_l tem que atingir E_d . Associado a E_d , está a tensão de ruptura (U_d), valor este que é muitas vezes determinado pela curva de Pachen. Esta curva relaciona U_d com a pressão do gás da cavidade multiplicada pela distância entre eléctrodos. Assim, a tensão de disrupção pode ser aumentada ou aumentando a distância entre eléctrodos ou aumentando a pressão do meio gasoso, quando a multiplicação das duas grandezas estiver à direita do valor mínimo da curva. Aumentando uma destas duas características, irá aumentar o número de moléculas por unidade de comprimento do percurso dos electrões e o percurso livre destes é estatisticamente menor [30]. Uma típica curva de Paschen para o ar é mostrada na figura 2.4.

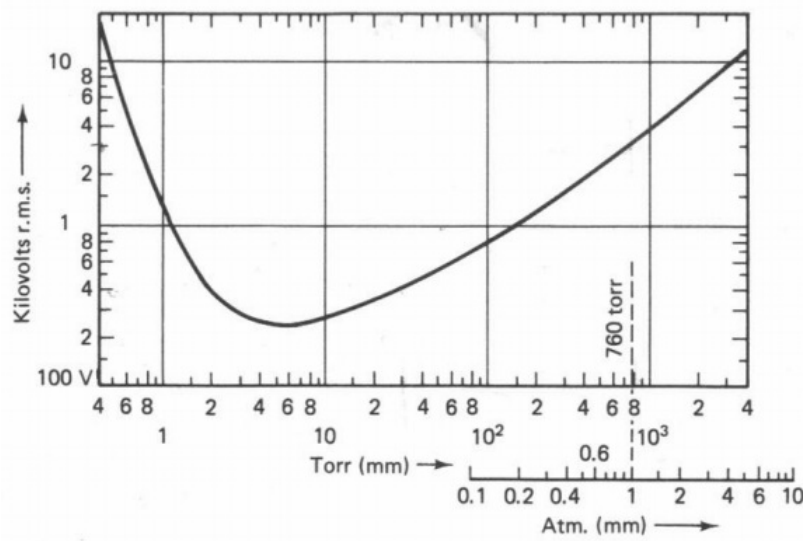


Figura 2.4: Curva de Paschen para o ar. (Fonte de: [24])

De acordo com Boggs, S.A, o tempo médio de espera para se dar uma descarga depende da tensão aplicada, assim como das dimensões da cavidade. Para uma cavidade virgem com 1 mm^3 e preenchida com ar à pressão atmosférica, o tempo estatístico de atraso (τ_s) é superior a 5 minutos para que o primeiro electrão seja libertado, com o valor da tensão acima do valor mínimo que origina a disrupção [5]. Depois de ocorrida a primeira descarga são deixadas cargas superficiais nas paredes da cavidade devido a descargas anteriores, sendo τ_s na ordem de alguns milisegundos [27][12].

Existindo τ_s , existe também um valor de sobretensão (ΔU), que é a diferença entre U_{lim} e U_d , como se pode ver na figura 2.5. A presença de alguma quantidade de vapor de água reduz τ_s devido a electrões que são separados das moléculas de água após a colisão com electrões livres [27].

A probabilidade $P(t)$ para que se desencadeie uma avalanche no tempo t é dado pela equação 2.1 [11]:

$$P(t) = 1 - e^{-\frac{t}{\tau_s}} \quad (2.1)$$

Assim, quando uma cavidade está submetida a *stress* eléctrico e ocorrência contínua de descargas parciais, dá-se a degradação do material causando o seu envelhecimento.

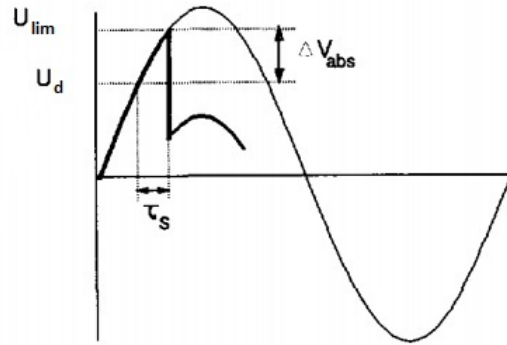


Figura 2.5: Relação entre o tempo estatístico de atraso τ_s e a sobretensão ΔU . (Adaptado de: [29])

2.4 Degradação causada por Descargas Parciais

Quando o valor de tensão limiar é atingido, dá-se a ocorrência de DPs e a consequente degradação do material dielétrico. Esta degradação deve-se aos dois aspectos seguintes:

- Pela emissão de iões altamente energéticos durante a descarga contra a superfície do material dielétrico;
- Por reacções químicas entre o oxigénio, ozono e radicais na superfície da cavidade.

O processo de degradação está descrito na figura 2.6.

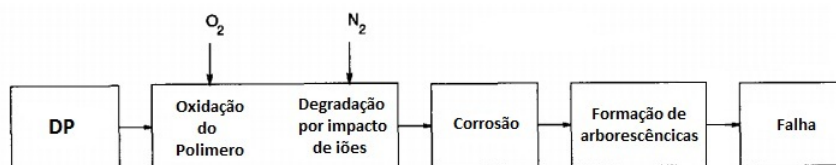


Figura 2.6: Esquema simplificado do processo de degradação do polímero. (Adaptado de: [29])

Quando o oxigénio está presente no interior da cavidade, ao ocorrer uma DP, vários produtos altamente oxidativos são formados (O , O_3 e O_2^-). Também são produzidos hidrogénio, monóxido de carbono, metano e dióxido de carbono. Assim, dão-se reacções entre estes produtos e radicais do material dielétrico produzidos. Estas reacções produzem ácidos que preenchem as paredes da cavidade com uma camada fina e condutora com apenas alguns micrómetros de espessura.

Quando todo o oxigénio é consumido, o impacto por iões de ozono origina a corrosão do dielétrico, formando arborescências eléctricas. A consequência destes efeitos é a redução do tempo estatístico de atraso e da tensão limiar [29][33].

Capítulo 3

Detecção, medida e análise de Descargas Parciais

O envelhecimento e a falha dos sistemas de isolamento são iniciados por processos eléctricos, mecânicos, térmicos e químicos durante a sua produção ou durante o período de funcionamento. São criados defeitos no material isolante que reduzem a sua permitividade relativa. Através destes defeitos podem ocorrer descargas parciais, causando degradação do dieléctrico e consequentemente uma limitação no tempo de vida útil do isolador. De modo a evitar estas consequências, torna-se necessário a detecção e identificação de descargas parciais de modo a detectar pontos fracos no isolamento evitando a sua falha total [18][31].

3.1 Circuito de detecção

A ocorrência de uma descarga parcial dentro de uma cavidade no dieléctrico causa uma transferência de cargas numa pequena distância e num período finito de tempo na direcção do campo eléctrico aplicado. Assim, com esta transferência de cargas aparece um pulso de alguns pC (10^{-12} coulomb) de carga no circuito externo do qual a amostra faz parte, dependente do diâmetro da cavidade. Geralmente o pulso de corrente apresenta uma duração média de dezenas de nano segundos, sendo necessário frequências de amostragem suficientemente altas para a detecção destes pulsos. Torna-se então necessário estudar as suas características como amplitude, polaridade, distribuição estatística e frequência de ocorrência através de um sistema de medição de descargas parciais. Na figura 3.1 é mostrado o circuito habitualmente usado para detecção de DPs [18][9][20][26][28].

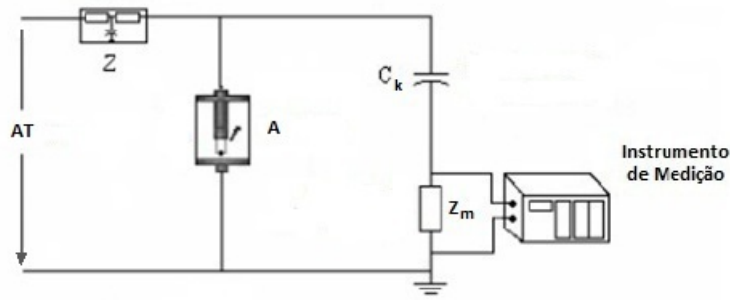


Figura 3.1: Esquema do circuito de detecção de DP usado. (Adaptado de: [16])

Este circuito é principalmente composto por um condensador de acoplamento (C_k) para estabilizar a tensão através da amostra (A), por um filtro ou impedância (Z), pelo instrumento de medição e por uma impedância de medida (Z_m), que pode ser desde uma simples resistência de valor comercial, até um circuito envolvendo condensadores, bobinas e resistências. Segue-se uma breve descrição do funcionamento do circuito [20].

A fonte de tensão alternada fornece alimentação para o circuito. Em geral as fontes de alimentação de alta tensão utilizam transformadores elevadores de tensão, que apresentam alta impedância para pulsos de alta frequência. Para que o pulso de corrente devido à descarga parcial possa propagar-se e ser detectado na impedância de medição, um condensador de acoplamento é colocado em paralelo com a capacidade da amostra. Desta forma, o circuito série formado pela capacidade da amostra, C_a , por Z_m e C_k será um caminho de baixa impedância para o pulso de descarga. O pulso medido na impedância de medição Z_m é amplificado e visualizado num osciloscópio, ou num instrumento de medição para o efeito [24].

Neste circuito de detecção de DP são utilizados filtros. Sendo estes insuficientes, a amostra assim como parte do circuito está contida dentro de uma gaiola de Faraday de modo a eliminar o ruído, interferências e perturbações existentes. Assim, no seu interior o campo eléctrico é praticamente nulo, evitando interferências e ruído que podem vir a impossibilitar a identificação dos pulsos de descarga da amostra por estes serem bastante fracos. Também o ruído térmico resultante da agitação térmica de electrões numa resistência causam uma flutuação aleatória de corrente na resistência, causando uma flutuação de tensão aos terminais da resistência que é visto como ruído de fundo no circuito. O nível de ruído considerado aceitável durante o ensaio não deve exceder 50 % do nível aceitável de descarga [5][1].

Para que exista um sincronismo perfeito entre o valor de carga lido pelo aparelho de medição de DPs e o valor de carga no isolador tem de ser feita uma calibração. É usado um calibrador que gera uma onda de tensão quadrada, que em série com um condensador (C_c) de valor exacto faz passar através da amostra um valor exacto de carga [3]. A carga que é transferida para os eléctrodos da amostra é calculada através da expressão 3.1.

$$\Delta Q = C_c \Delta V \quad (3.1)$$

Alterando o factor de calibração (K_c) no aparelho de medição, calibra-se a amostra com o mesmo valor de carga fornecido pelo calibrador. Esta calibração é necessária, pois a capacidade do isolador varia entre diferentes isoladores. Métodos de calibração onde o sinal é injectado na impedância de medição não são normalmente eficazes, pois surge um erro de calibração que é função da capacidade da amostra [4].

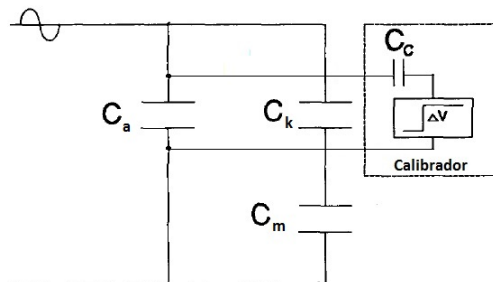


Figura 3.2: Método de calibração. (Adaptado de: [4])

3.2 Técnicas de Medida de DP

A interpretação dos resultados do ensaio é o passo mais importante na medição de descargas parciais. É necessário decidir se há indícios de um defeito, e em caso afirmativo determinar qual a sua origem. Para isso são habitualmente usadas duas técnicas para medida e análise de descargas parciais: medida de descargas parciais com resolução temporal e medida de padrões de descargas parciais com resolução em ângulo de fase. Neste trabalho foi usada a técnica de medição com resolução em ângulo de fase.

3.2.1 Medida de Descargas Parciais com Resolução Temporal

Nos últimos anos foram obtidos muitos resultados interessantes com esta técnica de detecção no tempo, utilizando largura de banda entre 500 e 1000 MHz.

Esta técnica de medida de descargas parciais com resolução temporal consiste em registrar a forma de onda do pulso de descarga em função do tempo.

Através da análise da evolução do pulso de descarga no tempo, e da realização de estatísticas relacionadas com parâmetros do pulso, tais como amplitude do pico, área do pulso de corrente, tempo de subida, descida e largura do pulso à meia altura é possível classificar os tipos de descargas e relacioná-las com o estado de degradação do material.

Uma das vantagens deste método é que existe uma relação directa entre as características físicas do defeito e a forma do sinal. Também foi descoberto que as fases de envelhecimento do material dieléctrico podem ser reconhecidas com este método, e em muitos casos, o ruído externo é menos influente em altas frequências, do que nas bandas de frequência dos detectores clássicos [25][9][28][29].

A figura 3.3 apresenta a forma de onda do pulso de descarga para uma amostra nova de polietileno com cavidade cilíndrica, como exemplo.

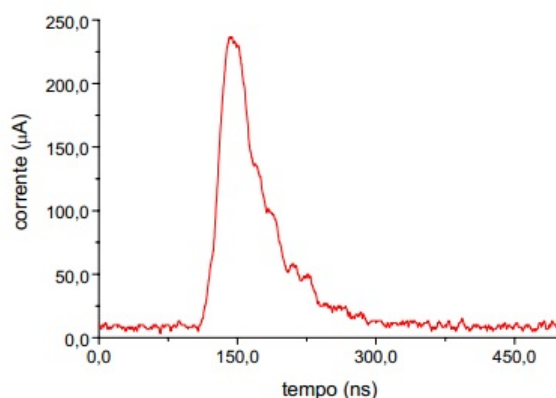


Figura 3.3: Forma de onda do pulso de descarga. (Fonte de: [9])

3.2.2 Medida de Descargas Parciais com Resolução em Ângulo de Fase

Este método permite que sejam observados os pulsos de descarga sobrepostos à onda sinusoidal de tensão de alimentação da amostra, formando a base da técnica de medida de padrões de descargas parciais com resolução em ângulo de fase. Assim, é possível ver a medida simultânea da altura do pulso e o ângulo de fase da ocorrência da descarga parcial. Cada pulso

de descarga reflecte o processo físico da descarga num determinado local, existindo uma forte relação entre o padrão destas descargas e o tipo de defeito que as causa [25].

De modo a descrever as características das DPs, muitas medidas das descargas têm vindo a ser introduzidas nos últimos anos. Apenas as medidas básicas irão ser usadas e portanto abordadas na presente dissertação. Um estudo mais aprofundado sobre estas medidas foi escrito por Gulski et al [21].

Usando um detector clássico de descargas parciais, pode-se ver na figura 3.4 as medidas básicas que descrevem as descargas.

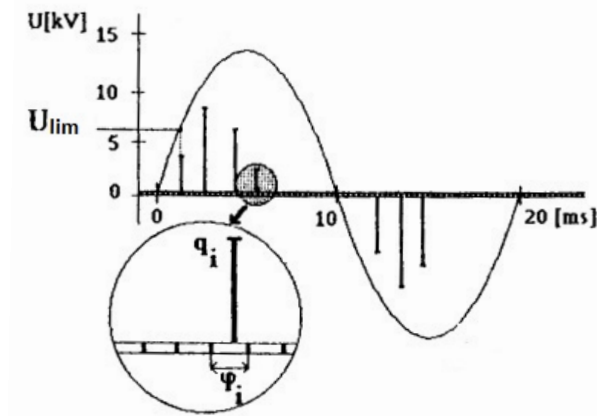


Figura 3.4: Diagrama esquemático das medidas básicas de descarga. (Fonte de: [21])

A amplitude da descarga (q_i), representa a carga em pC de um pulso de descarga. A fase da descarga (φ_i), representa o ângulo do ciclo de alimentação, em graus, de uma determinada descarga. A tensão de ignição, U_i , representa a tensão instantânea em kV (10^3 V) aplicada à amostra quando ocorre a descarga q_i , e a tensão limiar U_{lim} é o valor da tensão mínima imposta à amostra que desencadeia o início da ocorrência de DPs. Este valor de U_{lim} é expresso em tensão eficaz [20][21][1].

Existem algumas vantagens desta técnica sobre a técnica de medida com resolução temporal: o método é independente do caminho eléctrico entre o defeito e o detector; é usado um circuito detector convencional; o tipo de detector ou acoplamento utilizados não influencia o resultado, uma vez que a forma do pulso não é relevante e sim a sua altura relativa e ângulo de fase. O único requisito é a resolução do detector, que deve ter uma frequência de amostragem na ordem de $\simeq 1\text{MHz}$ [25].

3.3 Análise de Descargas Parciais

Os sistemas de medição de descargas parciais oferecem um meio para detecção de defeitos no isolamento, que de outra forma poderiam levar ao mau funcionamento do dieléctrico. No geral, existem seis tipos de descargas parciais:

1. Descargas efeito de coroa que ocorrem em pontos salientes a partir dos eléctrodos em gases ou líquidos;
2. Descargas na superfície que podem ocorrer em gases ou em óleo, quando há um forte *stress* na superfície do dieléctrico;
3. Descargas internas que ocorrem em cavidades que contêm gás. Também em cavidades com óleo se pode dar o processo de avalanche e causar descargas gasosas;
4. Descargas em arborescências eléctricas que podem começar a partir de condutores com partes salientes, ou a partir de cavidades no dieléctrico;
5. Descargas que ocorrem em componentes flutuantes quando existe má ligação à terra;
6. Ruído de contacto que pode ocorrer em casos de mau contacto ou fraca ligação à terra da amostra.

Cada tipo de descarga apresenta um padrão diferente, permitindo a sua identificação. Foram portanto criados modelos desses padrões permitindo a identificação da natureza da descarga. Cada padrão tem características que o identifica, como o ângulo da descarga, amplitude e número de descargas. Na figura 3.5 é possível visualizar esses padrões com medida em ângulo de fase.

Esta interpretação de resultados é bastante importante pois permite detectar a presença de DPs através da observação dos padrões de descarga, determinando assim a sua localização e estimando o perigo no isolamento causado pelas descargas detectadas. Mudanças no comportamento da amplitude da descarga e da sua tensão de extinção também podem ajudar a tirar conclusões.

Ainda assim, estes resultados podem ser influenciados por muitos factores aos quais são sensíveis, como a rugosidade da superfície do isolador, o envelhecimento, a amplitude do campo eléctrico aplicado, entre outros. Também a temperatura, pressão, tensão aplicada e duração do ensaio podem alterar as características da descarga. Todos estes parâmetros podem influenciar a medição dos pulsos de DPs e consequentemente a leitura dos sistemas de medição e a sua interpretação.

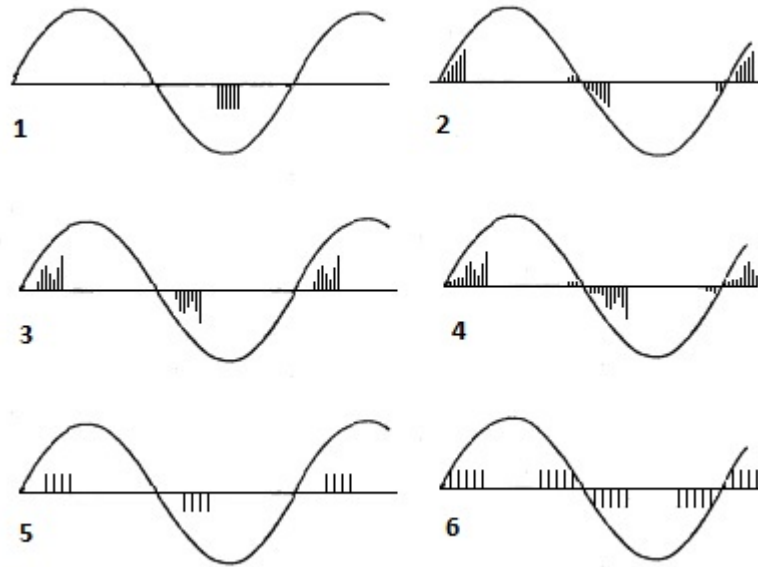


Figura 3.5: Padrões normais de descarga com resolução em ângulo de fase dos defeitos típicos no isolamento. (1) descarga efeito coroa, (2) descarga superficial, (3) descarga em cavidades, (4) descarga em arborescência eléctrica, (5) descarga em componentes flutuantes, (6) ruído por mau contacto. (Editado de: [20])

Assim sendo, o principal objectivo do diagnóstico de DPs é identificar defeitos no isolamento que causam descargas dos diversos tipos. Partindo do principio que cada pulso de descarga reflecte o processo físico no local da descarga, existe uma forte relação entre a forma destes padrões e o tipo de defeito no isolador. Assim, a medida de descargas em ângulo de fase oferece um elevado número de vantagens, especialmente para uso de alguns componentes industriais [20].

Capítulo 4

Simulações e Modelos Propostos

4.1 Isolador em estudo

O isolador em estudo foi um projecto personalizado feito pela empresa Indisol. Este isolador foi projectado para fazer a travessia para um armário, onde existia uma preocupação com as suas medidas devido ao pouco espaço existente para colocar o isolador. O isolador em estudo é mostrado na figura 4.1.



Figura 4.1: Isolador de travessia em estudo

Na figura 4.2 estão representadas duas perspectivas do isolador estudado, de modo a ter uma melhor ideia da sua forma e constituição. É possível visualizar os seis grampos que constituem o isolador assim como o seu interior que é atravessada pelo condutor.

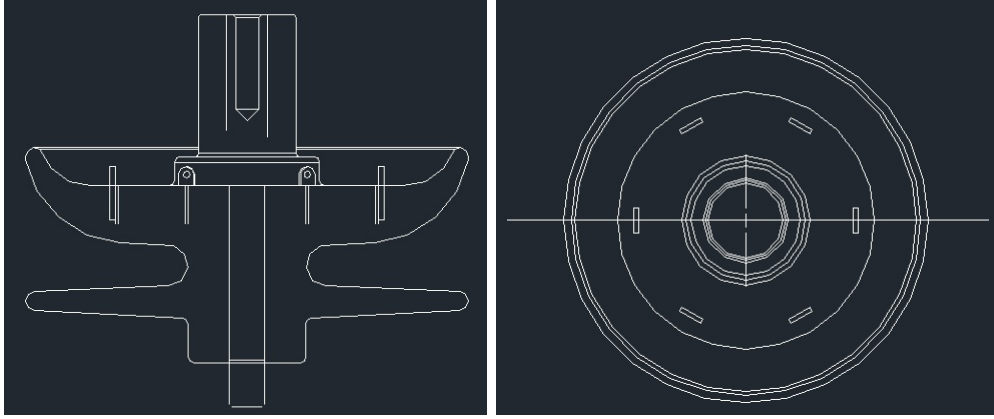


Figura 4.2: Modelo do isolador de travessia estudado

4.2 Projecto Flux2D

Foi usado o programa de elementos finitos Flux2D para simular e melhorar o isolador de travessia. Com um desenho de AutoCad do isolador, desenhou-se o modelo do isolador em Flux2D com as medidas reais.

Por estar a ser usado um programa de simulação a duas dimensões, a terceira dimensão só se consegue simular usando uma simetria de rotação, sendo o condutor do isolador de travessia o seu eixo de rotação. Assim, não pode ser obtida a evolução do campo em direcções perpendiculares ao plano radial, ou seja, no plano azimutal. Ao ser simulado o isolador com estas condições, é como se este tivesse contido na zona dos grampos uma espécie de anel coaxial com o eixo, com altura e espessura igual aos grampos reais.

Feita a geometria procedeu-se à definição dos materiais que compõem o isolador. O material isolante usado foi o epóxi cicloalifático, com $\epsilon_r = 4.1$. Como o objectivo da análise é a interpretação das linhas equipotenciais, apenas a permitividade do material é suficiente para definir o material. Os grampos e o condutor são definidos no programa como condutores perfeitos, tendo sido imposta uma tensão de 24 kV ao condutor e uma tensão de 0 V aos grampos, pois na realidade são ligados por um arame que tem como função puxar o conector separável contra o isolador de modo a segurá-lo e a fazer uma ligação perfeita entre os condutores. O valor de tensão imposta ao condutor não irá influenciar os resultados pois o importante é fazer uma análise às zonas críticas de concentração de campo eléctrico, e não analisar a sua amplitude. Todo o meio envolvendo o material foi definido como ar/vácuo.

Foi analisada a estrutura do conector separável, de modo a fazer o seu desenho para algumas simulações. Estes conectores são fabricados com material dieléctrico *EPDM* (*ethylene propylene diene monomer*), contendo na sua camada exterior *EPDM* condutor, de modo a ter um potencial nulo à sua superfície. Ambas as fichas técnicas dos respectivos conectores encontram-se em anexo.

Assim sendo, foi desenhado para algumas simulações a estrutura do conector separável, tendo sido definido o dieléctrico *EPDM* com $\epsilon_r = 2.5$, e imposta uma tensão de 0 V à camada exterior do conector. Nas simulações o conector não chega à base do isolador. Para que se assemelhe à realidade, existe um espaço de cerca de 1 milímetro.

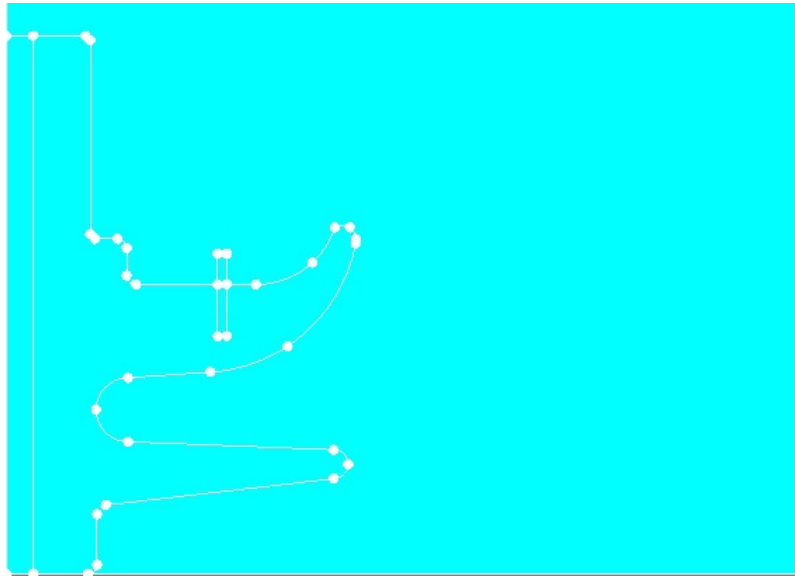


Figura 4.3: Desenho no Flux2D do isolador base

É possível visualizar o desenho do isolador no Flux2D, na figura 4.3. A figura 4.4 mostra o isolador com o *mesh*, que não é mais que uma malha de simulação onde em cada triângulo é calculado um valor para simulação. Como dá para ver na malha da figura existem elementos mais pequenos na zona do isolador do que fora, significando maior precisão nos cálculos efectuados na zona do isolador, a zona em estudo.

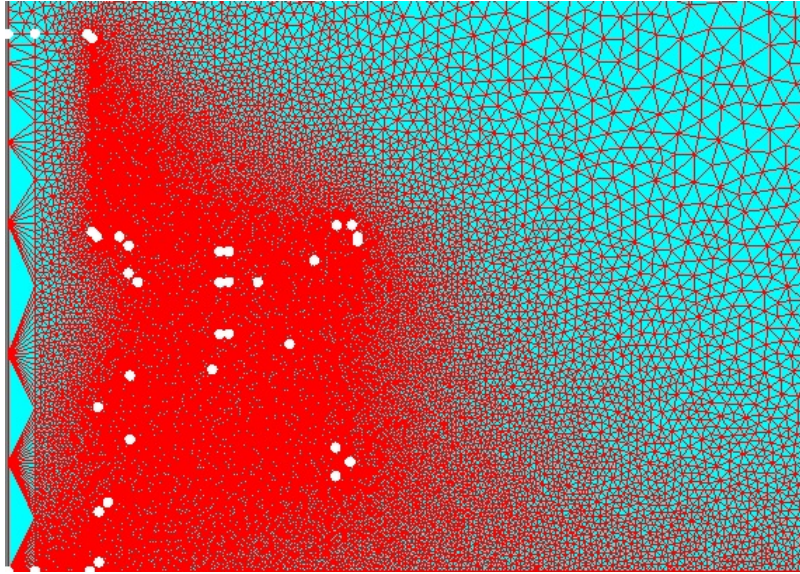


Figura 4.4: Desenho no Flux2D do isolador base com malha de simulação

4.3 Simulações

Feito o modelo do isolador, procedeu-se à sua simulação e análise, feita no capítulo seguinte. Uma vez definido o isolador base no Flux2D, é apenas necessário fazer pequenas modificações de modo a simular os modelos propostos.

Suspeitava-se que a zona envolvente aos grampos era o ponto fraco do isolador, originado descargas parciais. Assim sendo, foi simulado o modelo do isolador base e analisados os seus resultados de maneira a comprovar a existência dessa zona crítica.

De modo a comparar resultados entre propostas foi analisada a evolução do campo eléctrico ao longo dos caminhos definidos nas figuras. O sentido dessas caminhos definidos são do condutor para a periferia do isolador.

As simulações e modelos apresentados são apenas os que influenciaram a melhoria do modelo final, pois outros modelos foram projectados para posterior simulação e análise.

4.3.1 Isolador base

Foi feita a simulação do isolador base, ou seja, sem nenhuma alteração prévia na sua estrutura, apresentando o resultado da distribuição das linhas equipotenciais da figura 4.5.

Analisando a distribuição é possível concluir que as zonas mais críticas de concentração de campo eléctrico são em zonas que envolvem os grampos e junto ao condutor, onde as linhas equipotenciais estão mais próximas umas das outras. Irá ser analisada e estudada a zona dos grampos, pois é a zona problemática do isolador de travessia. Como os grampos são zonas metálicas contendo raios de curvatura bastante pequenos são zonas propícias à ocorrência de

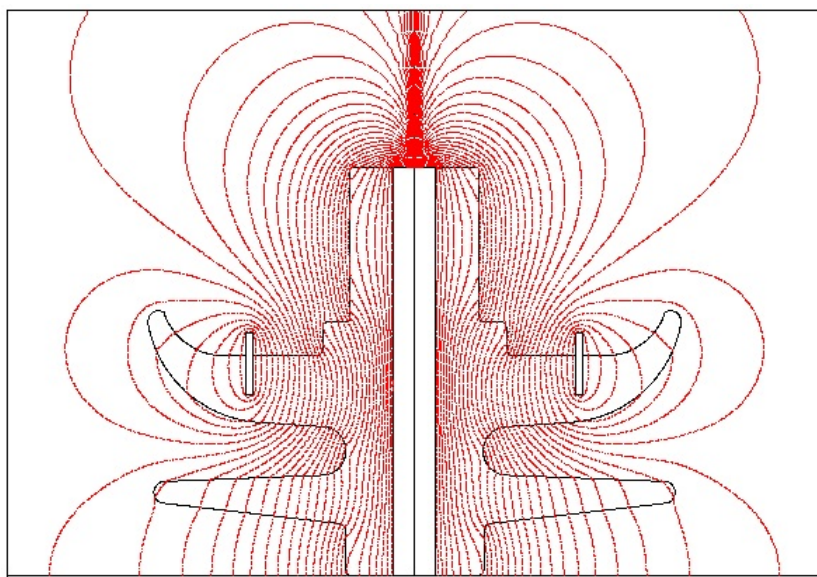


Figura 4.5: Linhas equipotenciais do isolador base

DPs. Outro aspecto relevante é o facto dos grampos terem uma tensão imposta de 0 V, o que obriga a uma maior concentração de linhas equipotenciais entre o condutor e os grampos, significando uma maior amplitude de campo eléctrico e maior probabilidade de ocorrência de DPs nas zonas críticas. Se os grampos não estivessem ligados à terra, estariam com uma tensão flutuante, reduzindo a probabilidade de ocorrência de DPs.

Também se visualiza facilmente que existe uma grande concentração de campo eléctrico na zona exterior dos grampos, que está em contacto com o ar, figura 4.6. Esta zona será ignorada, pois ao ser encaixado o conector separável, este irá proteger a zona exterior dos grampos, devido à sua camada exterior condutora ligada à terra.

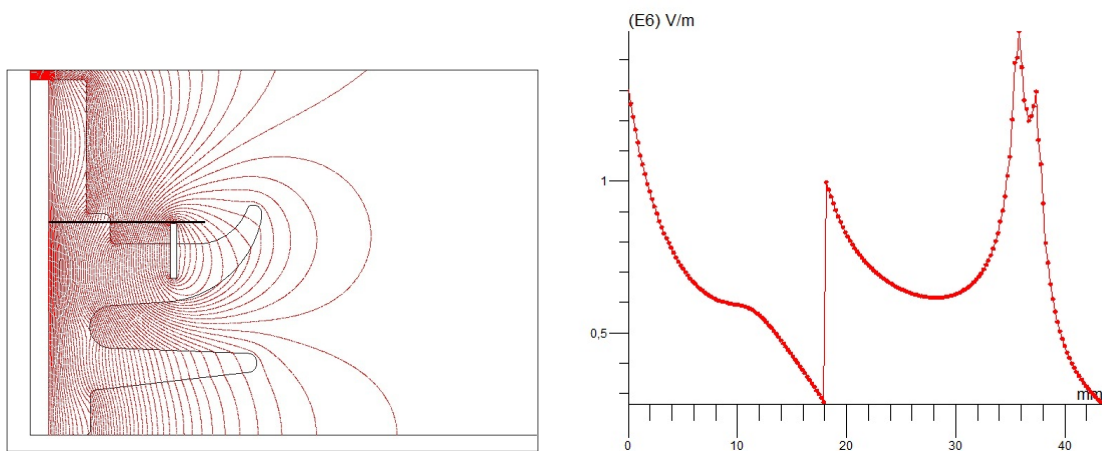


Figura 4.6: Evolução do campo eléctrico na zona exterior dos grampos

Foram traçados dois caminhos, um relativo à zona superior do grampo e outro inferior de modo a retirar valores de campo eléctrico para posteriormente compará-los com os valores retirados dos modelos propostos, discutindo assim as suas melhorias. Os dois caminhos podem ser visualizados nas figuras 4.7 e 4.8.

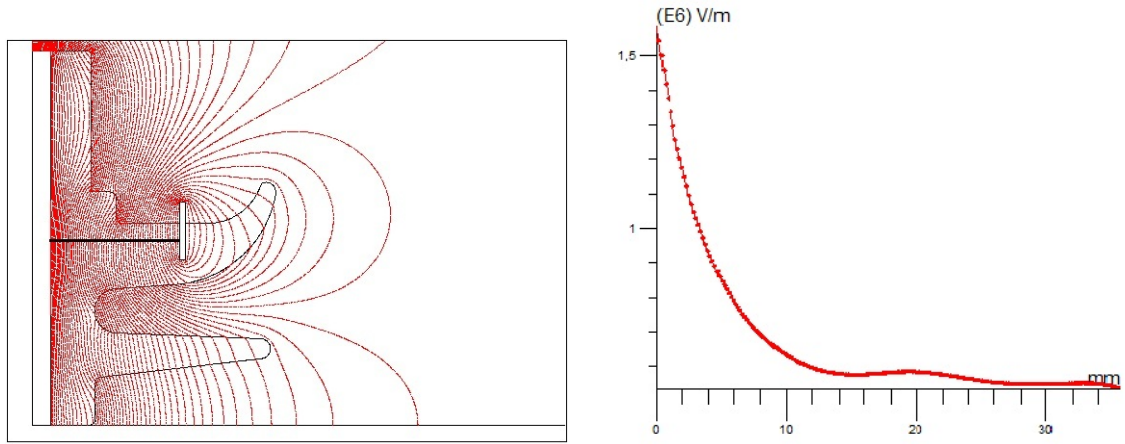


Figura 4.7: Caminho superior e evolução do campo eléctrico no isolador base

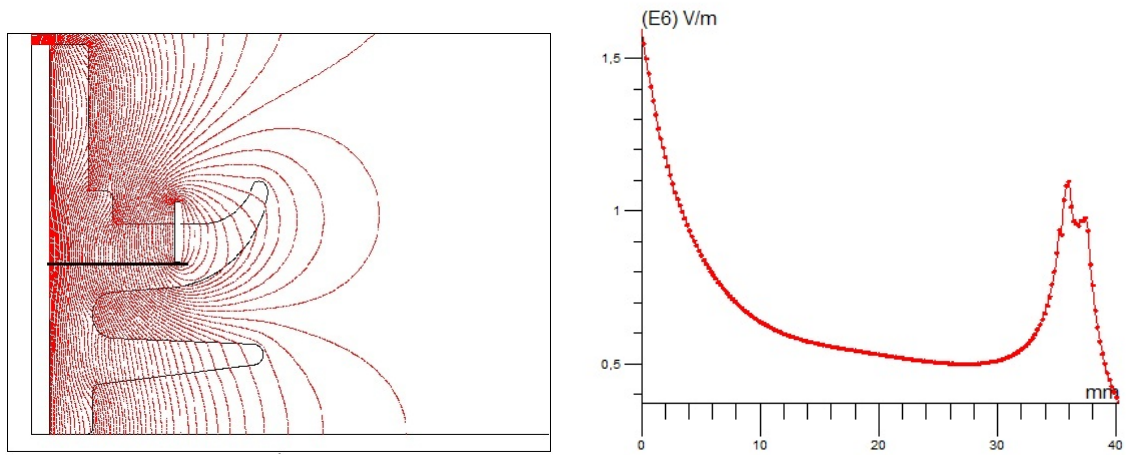


Figura 4.8: Caminho inferior e evolução do campo eléctrico no isolador base

Ao analisar os dois caminhos conclui-se rapidamente que apenas o caminho inferior apresenta um ponto critico na zona inferior do grampo. Esta conclusão é facilmente retirada pois o valor da amplitude do campo eléctrico sobe acentuadamente de valores a rondar os $0.5 \times 10^6 \text{ V/m}$ para cerca de $1.1 \times 10^6 \text{ V/m}$, o que se torna um valor elevado para uma zona onde existem pontas metálicas, logo com probabilidade bastante elevada de ocorrência de DPs.

4.3.2 Isolador com grampos curvados

De modo a melhorar a zona inferior dos grampos, ou seja, de modo a reduzir a concentração de campo eléctrico na extremidade inferior destes, foi pensado como possível solução inclinar ligeiramente os grampos para fora do isolador de modo a não compactar tanto as linhas equipotenciais. Com esta solução a amplitude máxima do campo eléctrico na zona inferior dos grampos é reduzida. Esta solução pode ser visualizada na figura 4.9.

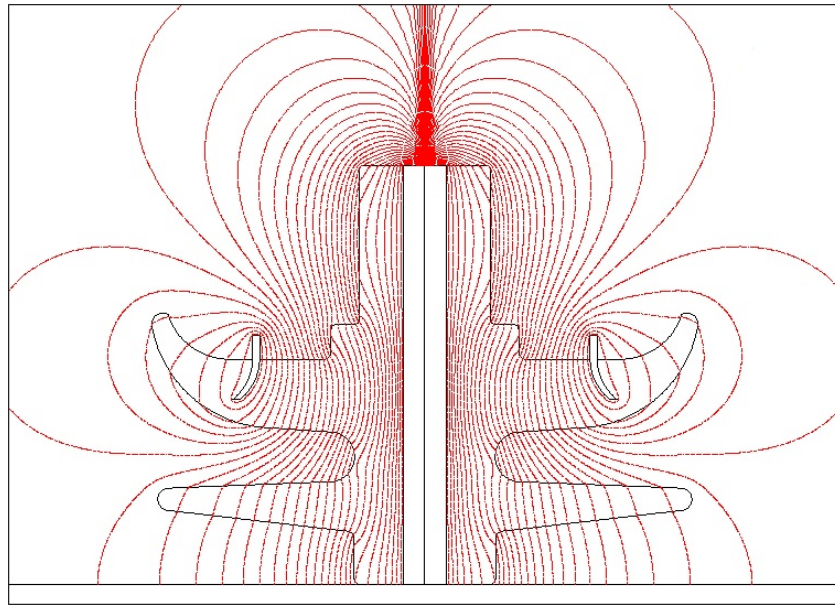


Figura 4.9: Linhas equipotenciais do isolador com grampos curvados

Analisando detalhadamente a distribuição das linhas equipotenciais na figura 4.9, verifica-se que as linhas equipotenciais na zona inferior do grampo estão mais espaçadas do que no caso anterior (4.5), significando valores de campo eléctrico mais reduzidos.

Ao analisar os dois caminhos das figura 4.10 e 4.11, verifica-se que o caminho superior praticamente não sofreu alterações, enquanto que no caminho inferior o valor do campo eléctrico foi reduzido de $1.1 \times 10^6 \text{V/m}$ para $0.6 \times 10^6 \text{V/m}$, uma redução significativa.

Esta solução ao parecer ideal, na realidade não é. Isto porque na realidade os grampos não são uma espécie de anel contínuo como na simulação. Assim sendo, como já foi referido também é bastante provável que existam DPs no plano azimutal dos grampos, plano este que não pode ser simulado no Flux2D. Assim, irá ser proposta uma outra solução que permita diminuir o campo eléctrico na zona inferior dos grampos e ao mesmo tempo faça uma protecção do seu plano azimutal.

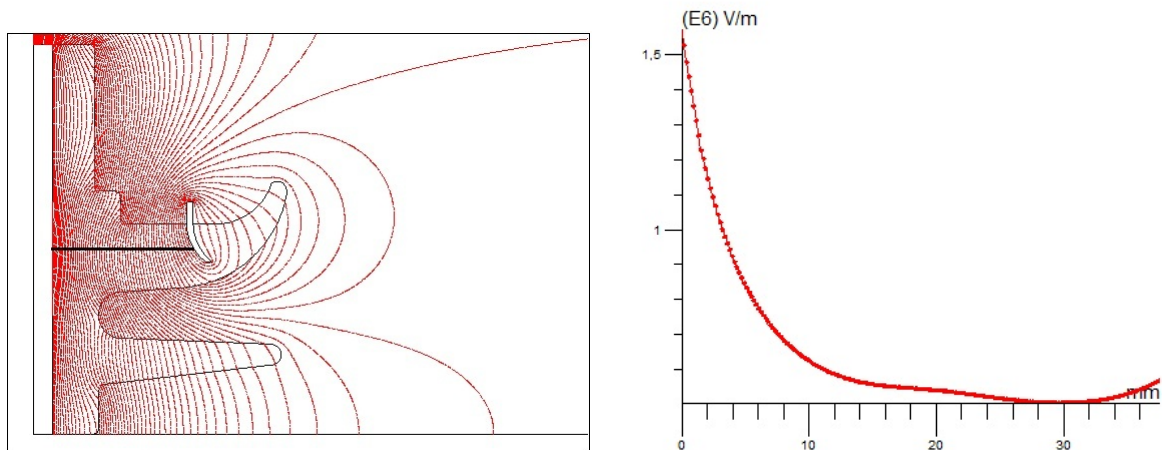


Figura 4.10: Caminho superior e evolução do campo eléctrico no isolador com grampos curvados

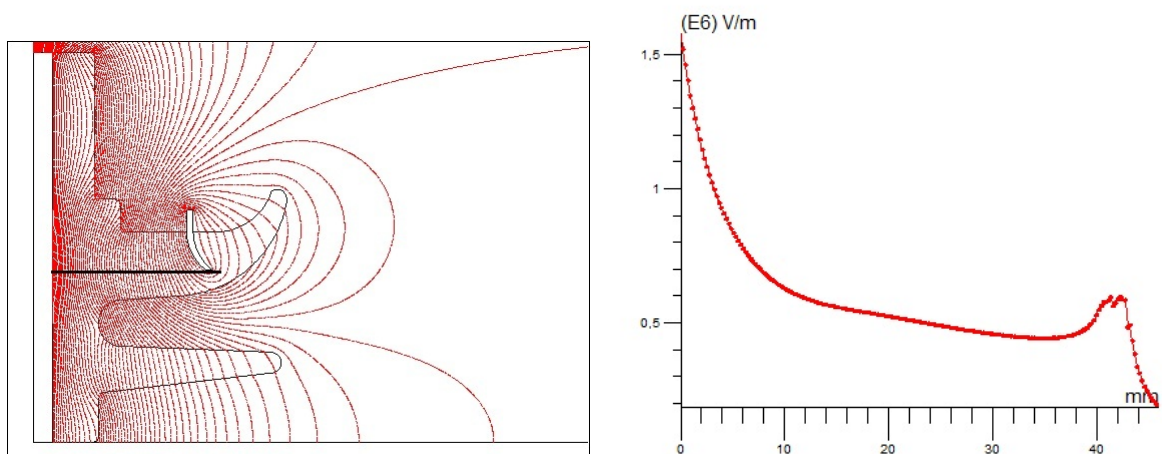


Figura 4.11: Caminho inferior e evolução do campo eléctrico no isolador com grampos curvados

4.3.3 Isolador com ecrã interno

Nesta simulação são esperadas poucas diferenças relativamente à simulação anterior. Apesar da simulação anterior não conter os seis grampos separados como na realidade, e por haver possibilidade de DPs no eixo azimuthal, foi projectado este ecrã interno para fazer a protecção aos grampos. Ou seja, em termos de simulação as diferenças são mínimas, mas na realidade espera-se uma melhoria significativa. É possível visualizar este modelo na figura 4.12, onde existe um ecrã à frente dos grampos, com uma geometria curvada de modo a oferecer as vantagens da simulação anterior.

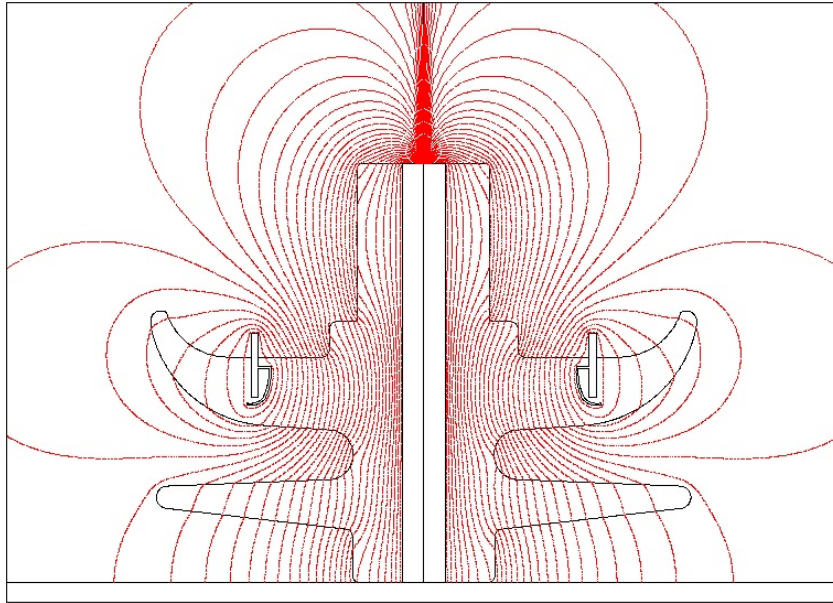


Figura 4.12: Linhas equipotenciais do isolador com ecrã interno

Foram traçados os mesmos dois caminhos que as simulações anteriores, superior e inferior, apresentando os resultados mostrados nas figuras 4.13 e 4.14.

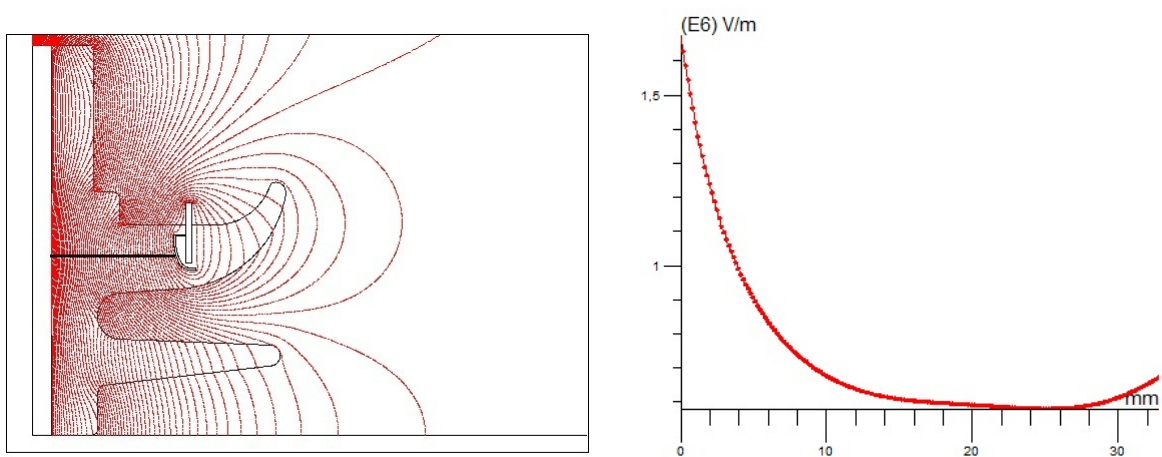


Figura 4.13: Caminho superior e evolução do campo eléctrico no isolador com ecrã interno

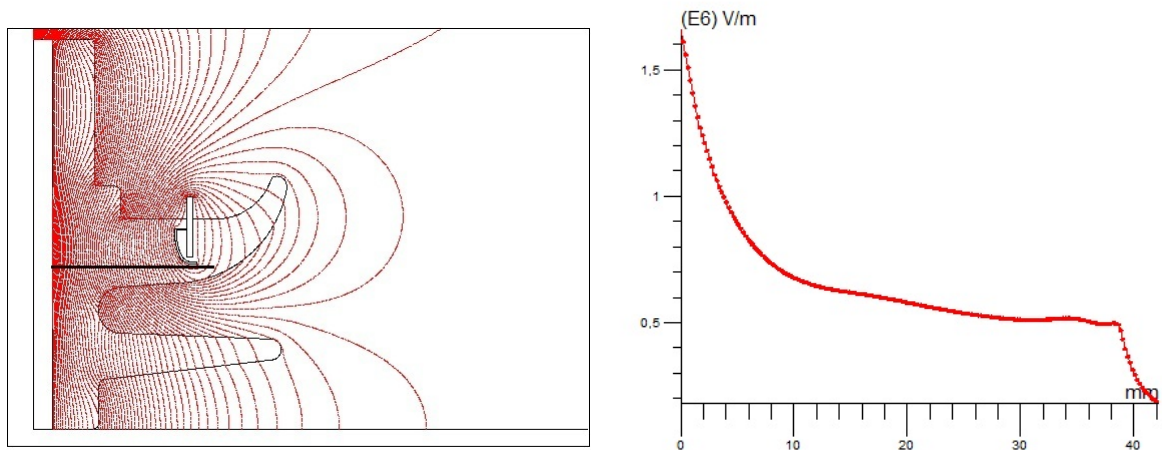


Figura 4.14: Caminho inferior e evolução do campo eléctrico no isolador com ecrã interno

Como já era de esperar os resultados são bastante parecidos com os da simulação anterior. A diferença centra-se apenas no valor do campo eléctrico na zona mais próxima do ecrã que sobe agora de $0.6 \times 10^6 \text{ V/m}$ para $0.7 \times 10^6 \text{ V/m}$. Esta alteração deve-se à redução do espaço entre o condutor e o ecrã ou grampo, comparativamente à simulação anterior.

Tendo sido já encontradas duas soluções para fazer a melhoria na zona dos grampos, foram então feitas as simulações com o conector separável de modo a fazer a analisar das linhas equipotenciais após a sua inclusão. A figura 4.15 mostra a evolução do campo eléctrico na zona inferior do conector.

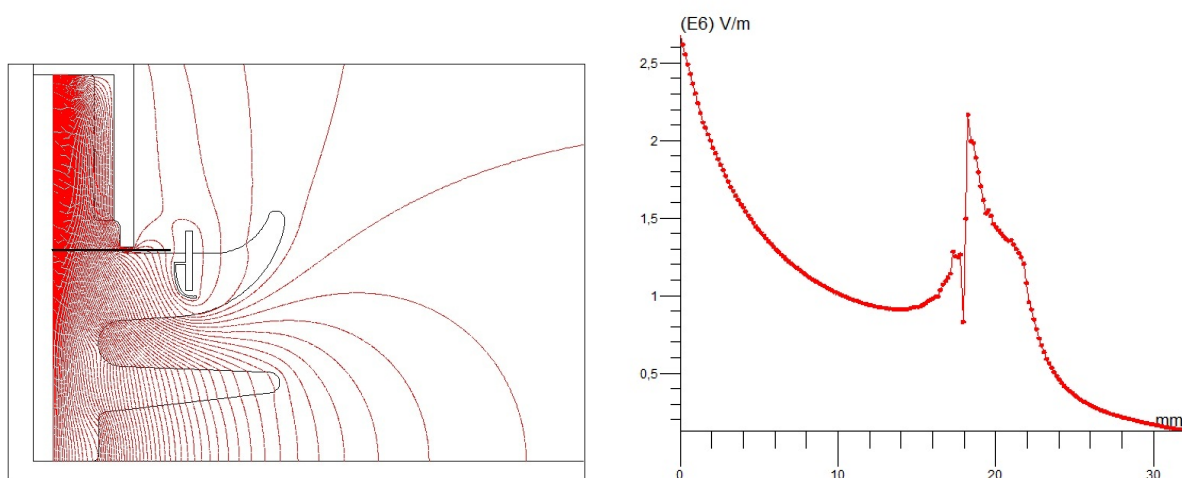


Figura 4.15: Caminho e evolução do campo eléctrico ao longo da brecha entre o conector e a base do isolador

Como se pode visualizar na figura 4.15, o campo eléctrico desde a periferia do condutor vai diminuindo até à zona por baixo da manga onde existe um pico para cerca de $2.2 \times 10^6 V/m$ que é um valor bastante elevado. Esta falha ocorre pois na zona onde o conector está encaixado as linhas equipotenciais são distribuídas entre o condutor e a zona de potencial nulo, enquanto que nesta falha por não haver zona de potencial nulo existe uma fuga das linhas equipotenciais. Torna-se então necessário recuar o ecrã interno de modo a proteger este ponto critico, assim como manter a protecção interior dos grampos projectada anteriormente.

4.3.4 Isolador com ecrã interno recuado

Esta configuração foi proposta de modo a melhorar as condições nas zonas onde a probabilidade de ocorrência de DPs era mais elevada, ou seja, a zona inferior dos grampos e a zona por baixo do conector que cria uma zona critica no espaço entre o conector e a base do isolador.

Para que o novo modelo proposto cumpra esses requisitos foi usada a proposta anterior com o ecrã recuado como se pode ver na figura 4.16.

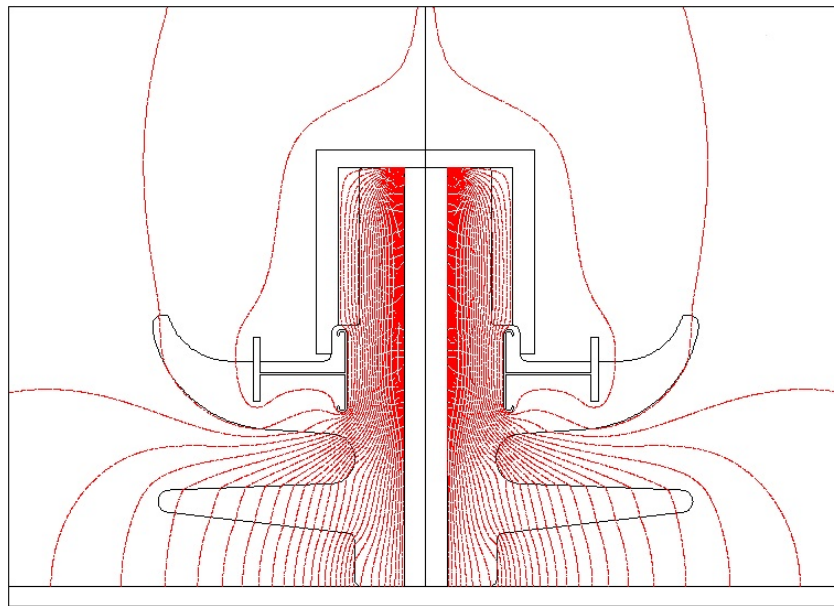


Figura 4.16: Linhas equipotenciais do isolador com ecrã interno recuado

Este recuo do ecrã tem como objectivos oferecer protecção á falha entre o conector e o isolador, ao mesmo tempo que continua a proteger a zona inferior dos grampos. Uma vez que os grampos e consequentemente o ecrã estão ligados à terra, não haverão linhas equipotenciais nessa falha, o que soluciona o campo eléctrico elevado verificado.

Uma diferença bastante importante entre o ecrã projectado anteriormente e este está nas suas extremidades, que têm que ser arredondadas de modo a não criar pontas ou zonas metálicas

com raios de curvatura reduzidos por serem mais propícias à ocorrência de DPs. Assim, as extremidades da malha interior são arredondadas para fora fazendo um acompanhamento mais suave das linhas equipotenciais.

Neste caso a extremidade inferior é a mais importante pois o campo eléctrico é mais elevado que na superior, logo mais importante ter um raio de curvatura elevado. Na figura 4.17 é mostrado esse aumento do campo eléctrico junto à extremidade inferior. Este aumento deve-se ao ecrã que empurra as linhas equipotenciais para baixo, como se as comprimisse. O mesmo não acontece com a extremidade superior pois o ecrã fica recuado relativamente ao conector, não havendo linhas equipotenciais a curvar a extremidade.

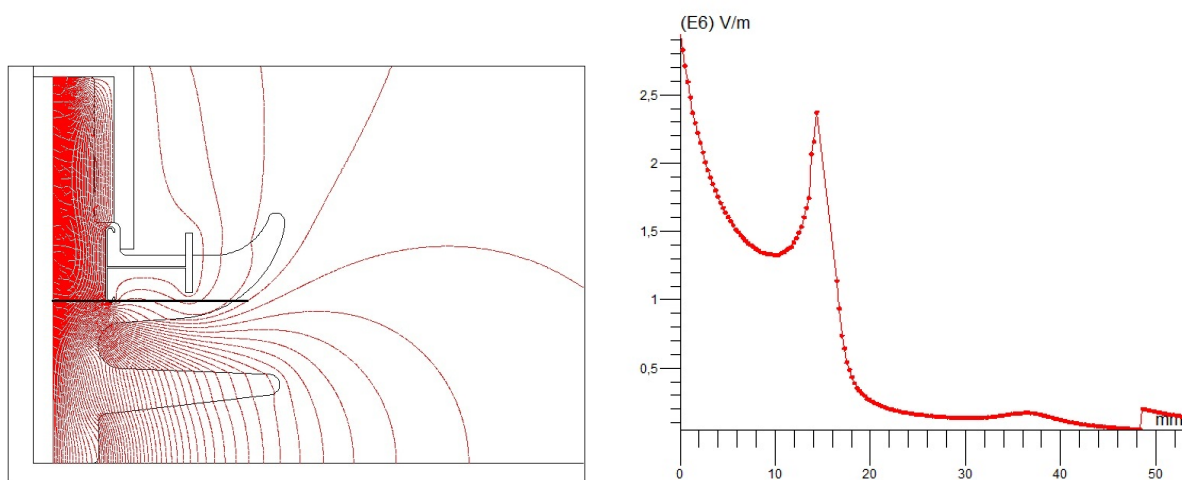
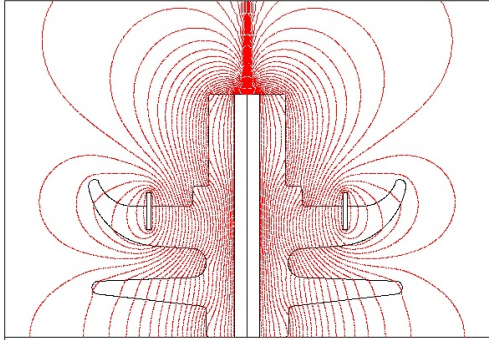
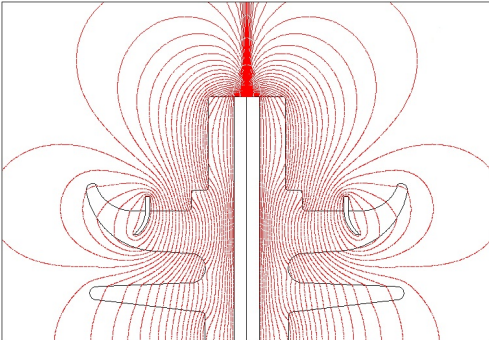
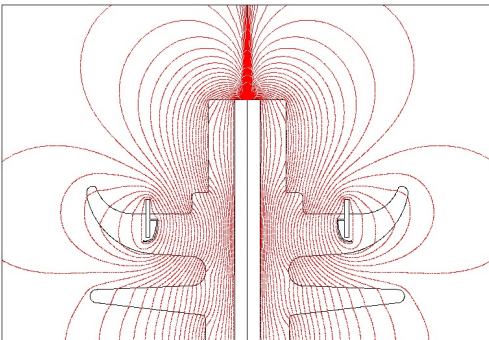
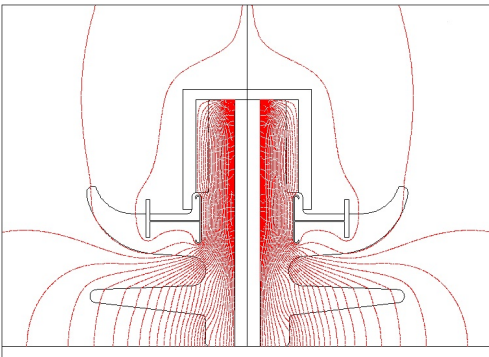


Figura 4.17: Caminho inferior e evolução do campo eléctrico no isolador com ecrã interno

Relativamente à curvatura dos grampos, neste modelo proposto estes estão direitos como no isolador base, pois a diferença do campo eléctrico na zona envolvente aos grampos é mínima entre os dois modelos. Pode-se chegar a essa conclusão pois no caminho da figura 4.17, o campo eléctrico praticamente se mantém constante por baixo da zona dos grampos, a cerca de 35 mm de distância no gráfico. Ao recuar o ecrã a maior parte das linhas equipotenciais estão distribuídas entre o condutor e o ecrã, sendo a amplitude do campo eléctrico na zona junto aos grampos bastante reduzida, não havendo por isso necessidade da sua curvatura.

4.4 Resumo das simulações

Tabela 4.1: Distribuição das linhas equipotenciais das várias simulações

Estrutura Interna	Distribuição das Linhas Equipotenciais	Campo eléctrico
Isolador Base		Zona crítica na extremidade inferior dos grampos, com $E = 1.1 \times 10^6 V/m$.
Isolador com grampos curvados		Campo eléctrico reduzido na extremidade inferior dos grampos para $E = 0.6 \times 10^6 V/m$, devido à sua curvatura.
Isolador com ecrã interno		Valor de campo eléctrico semelhante à simulação anterior, $E = 0.7 \times 10^6 V/m$, com a vantagem do ecrã interno proteger de possíveis DPs no eixo azimutal dos grampos.
Isolador com ecrã interno recuado e terminal		Campo eléctrico quase nulo junto dos grampos, devido ao recuo do ecrã interno.

Capítulo 5

Ensaaios e análise de resultados

Depois de terem sido feitas algumas simulações de modo a detectar a origem das falhas no projecto do isolador de travessia base, foram propostas melhorias. Algumas das soluções e propostas foram construídas tornando-se necessário fazer as medições de DPs de modo a confirmar a veracidade das simulações e complementando o trabalho.

Foram fabricados três isoladores de travessia para serem ensaiados: isolador base, isolador com grampos curvados e isolador com ecrã interno recuado. Usando um anel condutor para ligar os grampos, um conector separável que é usado para encaixar na *interface* deste isolador e silicone líquido para envolver o isolador, é possível fazer os ensaios suficientes que comprovem a existência das zonas críticas assim como a sua eliminação.



Figura 5.1: Isolador travessia com conector separável

O conector separável usado é um *Dead-end receptacle*, que é apenas um terminal para o isolador, apresentando o mesmo comportamento durante os ensaios que os restantes conectores de *interface A* que podem ser usados neste isolador. Irá ser usado o nome terminal, referindo o

Dead-end receptacle. O conector normalmente usado no isolador é mostrado na figura 5.1.

Os ensaios efectuados aos isoladores são feitos dentro de uma gaiola de Faraday, figura 5.2, e as medições de DPs são analisadas no computador com resolução em ângulo de fase. De modo a encontrar a tensão limiar, a tensão imposta ao isolador é aumentada até serem detectadas descargas no isolador. É considerada como descarga parcial um pulso de carga com amplitude superior a 5 pC.



Figura 5.2: Gaiola de Faraday para ensaio de DPs

5.1 Calibração do isolador

Antes de iniciar a fase de ensaio, é necessário proceder à calibração do aparelho de medição de DPs. Para isso é usado um calibrador que gera uma carga fixa, neste caso de 5 pC, que ao passar através do isolador é medida pelo aparelho de medição, figura 5.3. Devido à calibração ainda não estar feita, a carga lida no aparelho de medição é diferente do valor da carga imposta ao isolador, sendo necessário alterar o factor de calibração do aparelho de medição até este ler 5 pC, o valor real da carga aparente injectado no isolador.

Esta calibração convém ser feita para que as leituras de amplitude das DPs detectadas durante os ensaios tenham um valor o mais próximo possível do valor real.

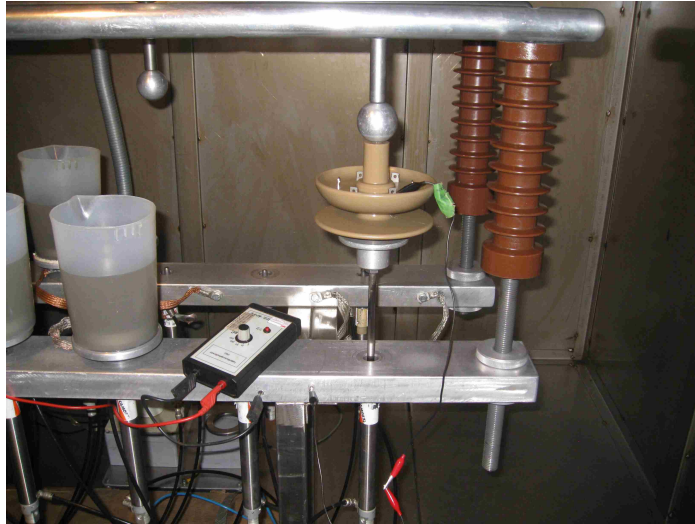


Figura 5.3: Calibração do isolador

5.2 Ensaaios dos isoladores

Feitas as simulações é necessário proceder ao ensaio das várias soluções propostas anteriormente de modo a confirmar as zonas críticas de concentração de campo eléctrico detectadas anteriormente. Serão ensaiadas e analisadas as várias propostas, permitindo fazer uma correlação entre as simulações e o ensaio real. Os valores de tensão limiar serão lidos de modo a fazer uma comparação entre propostas, confirmando a sua melhoria até à proposta final.

Inicialmente serão feitos os ensaios do isolador sem o terminal, de modo a estudar apenas a zona próxima aos grampos. Posteriormente serão feitos os ensaios com o terminal para analisar a zona inferior deste, assim como o modelo final, pois na realidade o isolador funciona sempre em conjunto com um conector.

Foram analisados em cada ensaio o valor da tensão limiar, tensão de extinção, assim como a amplitude das DPs em valores de tensão acima da tensão limiar. No ensaio do isolador base foi também analisada a amplitude das DPs em ambos os semi-ciclos de tensão por estes apresentarem uma grande discrepância entre os seus valores máximos.

5.2.1 Isolador base

Foi ensaiado o primeiro isolador, ou seja, o isolador base que não foi sujeito a nenhuma alteração. Este isolador contém apenas um fio de cobre interior a ligar os grampos internamente para que fiquem todos com uma tensão imposta de 0 V, uma vez que na realidade esta tensão é imposta apenas a dois dos seis grampos, através de um arame que força o conector separável a manter-se encaixado ao isolador.

A preparação do ensaio é mostrada na figura 5.4 onde o isolador é alimentado pela zona superior com uma tensão regulável pelo aparelho de medição de DPs.



Figura 5.4: Ensaio de DPs em isolador base

Ao aumentar a tensão imposta sobre o isolador, visualizou-se a ocorrência de DPs com uma tensão limiar de 14.2 kV e respectiva carga de 30 pC, como se pode visualizar na tabela 5.1. Também se pode visualizar que a amplitude das descargas aumenta bastante à medida que se aumenta a tensão imposta ao isolador, chegando a 33000 pC com 25 kV de tensão aplicada.

Tabela 5.1: Medições do ensaio do isolador base

	Tensão (kV)	Carga (pC)
U_{lim}	14.2	30
U_{ext}	16 ¹	5
U_{1neg}	20	23000
U_{1pos}	20	300
U_{2neg}	25	33000
U_{2pos}	25	600

Analisando a distribuição dos pulsos de DPs através do aparelho de medição verificou-se que os impulsos de maior amplitude das DPs se distribuíam pelo pico do semi-ciclo negativo da onda sinusoidal de alimentação. Foram também retirados para este valor de tensão os impulsos de DPs que se distribuíam pelo pico do semi-ciclo positivo da onda, com valores máximos de amplitude

¹Valor da tensão de extinção superior ao da tensão limiar devido à inconstância da sua leitura no instrumento de medição. Em condições normais, este valor é inferior ao da tensão limiar.

de 300 pC. Comparando com os impulsos do semi-ciclo negativo estes são desprezáveis, pois $23000 \text{ pC} \gg 300 \text{ pC}$. Na figura 5.5, apenas aparece o valor da amplitude máxima das DP's no semi-ciclo negativo, pois o aparelho de medição apenas mede a amplitude máxima das DP's. Como no semi-ciclo positivo a amplitude é bastante mais pequena foi necessário fazer um ajuste de escala de modo a ter uma noção da sua amplitude.



Figura 5.5: Padrão de descargas parciais em isolador base com $U_{rms} = 20 \text{ kV}$

Este tipo de distribuição é semelhante a um dos tipos de distribuição base abordados na análise de descargas parciais, que só apresenta descargas no pico do semi-ciclo negativo de tensão. A causa para este padrão de DP's é a ocorrência de descargas de efeito de coroa que ocorrem em zonas metálicas com raios de curvatura pequenos, no ar. Esta interpretação permite concluir rapidamente que estas descargas têm origem nos grampos metálicos que compõem o isolador.

5.2.2 Isolador com anel condutor

De modo a confirmar a ocorrência de DPs na zona exterior dos grampos devido à conclusão anterior, foi colocado um anel metálico em cima dos grampos, estando este anel ligado à terra, figura 5.6.

Espera-se que neste ensaio a tensão limiar aumente relativamente ao ensaio anterior, pois o anel não contém arestas metálicas afiadas como os grampos, e ao estar colocado sobre eles elimina o efeito das suas arestas afiadas, assim como elimina possíveis descargas no eixo azimutal dos grampos. Assim, é esperado que o número de DPs diminua assim como a amplitude das descargas.

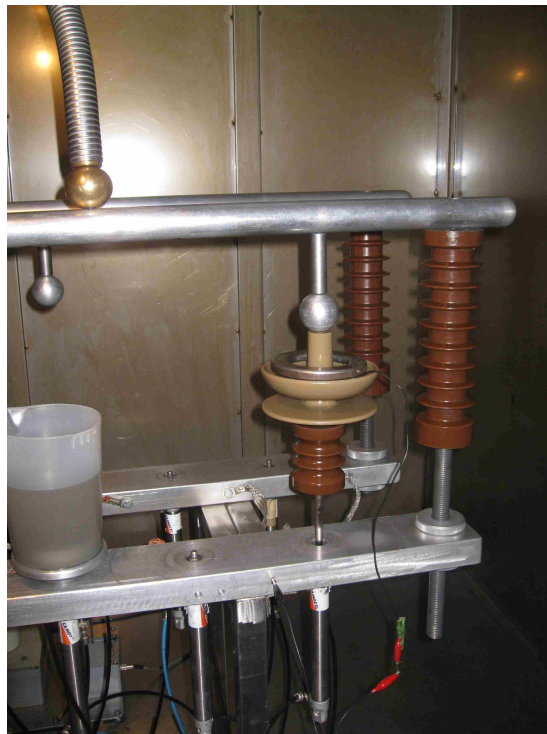


Figura 5.6: Ensaio de DPs em isolador com anel

Ao ensaiar o isolador com anel verificou-se que as expectativas estavam correctas, pois o valor da tensão limiar subiu de 14.2 kV para 25 kV. De salientar que mesmo impondo uma tensão sobre o isolador de 30 kV e 35 kV o valor máximo das DPs são 12 pC e 18 pC, que são valores bastante baixos, ao contrário do que foi verificado anteriormente, tabela 5.2.

Tabela 5.2: Medições do ensaio do isolador com anel

	Tensão (kV)	Carga (pC)
U_{lim}	25	4
U_{ext}	27 ²	2
U_1	30	12
U_2	35	18

Pelas conclusões que foram retiradas nas simulações do isolador, observou-se que uma das zonas críticas é a zona inferior aos grampos, daí ter sido proposto a sua curvatura para fora, que foi ensaiada seguidamente.

5.2.3 Isolador com anel e grampos curvados

Depois de ter sido ensaiado o isolador com anel e se ter concluído que a zona exterior dos grampos é bastante propícia à ocorrência de DPs, foi ensaiado o isolador com os grampos curvados também com o anel, de modo a excluir as DPs que ocorrem na sua zona exterior. Assim, será possível verificar se existe alguma melhoria na zona inferior dos grampos comparativamente com o modelo dos grampos direitos. A figura 5.7 mostra os grampos curvados durante o fabrico do isolador.



Figura 5.7: Isolador com grampos curvados durante o seu fabrico

²Valor da tensão de extinção superior ao da tensão limiar devido à inconstância da sua leitura no instrumento de medição. Em condições normais, este valor é inferior ao da tensão limiar.

Antes de ser feito o ensaio foi feito uma radiografia ao isolador mostrado na figura 5.8, onde também é possível ver os grampos curvados e ligados pelo fio de cobre, para que estejam todos ao mesmo potencial.



Figura 5.8: Radiografia do isolador com grampos curvados

Ao ser realizado este ensaio obteve-se resultados bastante positivos, tendo sido obtidas melhorias relativas ao ensaio anterior. A tensão imposta ao isolador foi até aos 40 kV sem ocorrência de DPs. Não foi possível subir mais a tensão pois deu-se a formação de um arco eléctrico entre o eléctrodo positivo, na zona superior do isolador, e o anel condutor.

Tabela 5.3: Medições do ensaio do isolador com anel e grampos curvados

	Tensão (kV)	Carga (pC)
U_{lim}	40	< 5 pC
U_{ext}	-	-

Com este ensaio foi possível concluir que existe uma melhoria significativa entre os grampos direitos e curvados, subindo o valor da tensão limiar dos 25 kV do ensaio anterior, para valores acima dos 40 kV, não tendo sido possível determinar o valor da tensão limiar devido à formação de arco eléctrico. Conclui-se também que as simulações estavam correctas, ao indicar uma concentração elevada de linhas equipotenciais na zona inferior aos grampos, que foi reduzida curvando os grampos para fora.

5.2.4 Isolador com anel, grampos curvados e terminal

Ao ser colocado o terminal já era esperado, após as simulações efectuadas, a ocorrência de uma zona crítica de concentração de campo eléctrico na sua extremidade inferior, pelo espaço deixado entre o terminal e a base do isolador. Assim, é esperado um valor baixo de tensão limiar semelhante ao ensaio do isolador base. Ao ser colocado o terminal, teoricamente a zona exterior dos grampos fica protegida não havendo praticamente campo eléctrico nessa zona. Na prática existe fuga de linhas equipotenciais como foi possível visualizar nas simulações devido ao espaçamento deixado entre o terminal e a base do isolador. Uma imagem da montagem deste isolador com o terminal para ensaio é mostrada na figura 5.9. Neste ensaio é mantido o anel condutor para apenas se estudar a zona crítica por baixo do terminal.

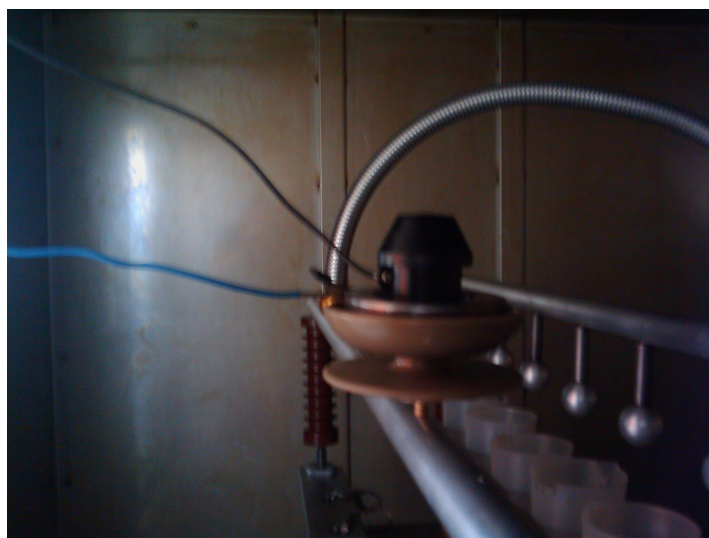


Figura 5.9: Montagem para ensaio do isolador com anel, grampos curvados e conector

Ao proceder ao ensaio do isolador verificou-se que as DPs começam bastante cedo, com uma tensão limiar de apenas 10 kV e com uma amplitude máxima de descargas de 30 pC que é um valor elevado semelhante ao obtido nos ensaios do isolador base, confirmando o que era esperado deste ensaio.

Tabela 5.4: Medições do ensaio do isolador com anel, grampos curvados e conector

	Tensão (kV)	Carga (pC)
U_{lim}	10	30
U_{ext}	9	5
U_1	15	550
U_2	20	2230

Assim, é confirmado que esta zona é ligeiramente mais critica que a zona envolvente aos grampos, tendo uma tensão limiar de 10 kV, mais baixa que a tensão limiar obtida no ensaio do isolador base de 14.2 kV. É de salientar que tanto nesta zona critica como a zona junto aos grampos, as DPs detectadas são de natureza diferente, tendo uma origem distinta. Isto é facilmente verificado pela diferença existente entre o padrão de descargas relativo à zona inferior do terminal, figura 5.10, e o padrão referente às descargas na zona dos grampos, figura 5.5.

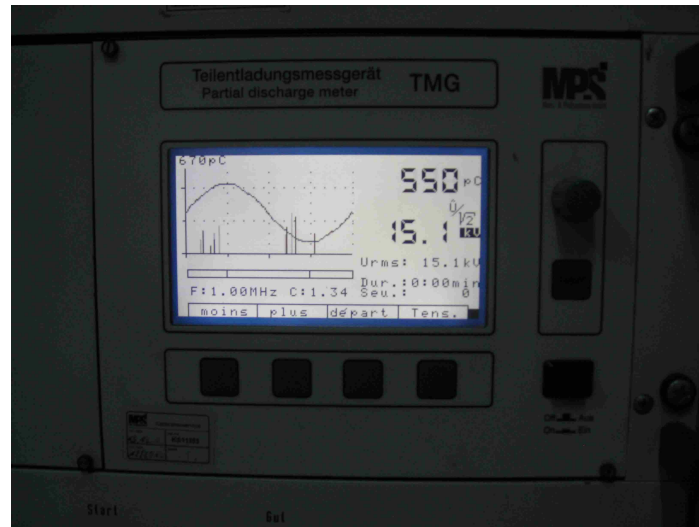


Figura 5.10: Padrão de descargas parciais em isolador com anel, grampos curvados e conector com $V_{rms} = 15kV$

A tensão limiar neste ensaio é mais baixa que no ensaio feito ao isolador base, pois a distância entre o conector e o condutor é menor que a distância entre os grampos e o condutor, logo a amplitude do campo eléctrico máximo será superior.

5.2.5 Isolador com anel, grampos curvados e terminal embebidos em silicone líquido

Existiu a possibilidade de fazer o ensaio da montagem anterior embebida em silicone líquido. O silicone líquido ao ter uma permissividade eléctrica inferior quando comparado com o ar, espera-se um valor de tensão limiar superior ao ensaio anterior, de modo a confirmar a existência da zona critica na zona inferior do terminal. O líquido de silicone usado tem $\epsilon_r = 2.4$.

Feitas as medições e analisando a tabela 5.6 facilmente se conclui que houve melhorias, ou seja, de uma tensão limiar de 10 kV anterior, este valor aumentou para 14 kV. Também a amplitude das DPs sofreu uma melhoria bastante significativa, reduzindo a amplitude máxima das DPs de 2230 pC para 95.4 pC, com uma tensão de 20 kV.

Estes resultados permitem chegar à conclusão que as DPs que se visualizam durante o ensaio têm origem no ar, ou seja, na zona já definida como critica por baixo do terminal.

Tabela 5.5: Medições do ensaio do isolador com anel, grampos curvados e manga embebidos em silicone líquido

	Tensão (kV)	Carga (pC)
U_{lim}	14	6.7
U_{ext}	11.7	5
U_1	20	95.4
U_2	25	964

5.2.6 Isolador com ecrã interno recuado e terminal

Depois de terem sido feitos todos os ensaios que comprovam a existência das duas zonas críticas detectadas, confirmando as simulações feitas, fez-se o ensaio do isolador final que soluciona essas mesmas zonas.

Esta proposta por ter o ecrã recuado protege a zona inferior do conector evitando uma concentração elevada de campo eléctrico, que daria origem a DPs. O ecrã foi também projectado de maneira a proteger a zona inferior dos grampos, sendo ligeiramente mais comprido que os grampos. Assim, o campo eléctrico na zona dos grampos é bastante reduzido evitando também DPs no plano azimutal dos grampos. Um exemplo de um ecrã interno semelhante ao fabricado pode ser visto na figura 5.11.



Figura 5.11: Novo ecrã interno recuado

Foi feita uma radiografia do isolador, figura 5.12, onde é possível distinguir o ecrã interno envolvendo o condutor, ligada a três grampos.



Figura 5.12: Radiografia do isolador com ecrã interno recuado

Esta ligação apenas a três grampos intercalados é suficiente, pois o arame do conector separável irá sempre ligar dois dos grampos em zonas opostas, o que faz com que pelo menos um dos grampos ligado ao ecrã seja ligado ao arame. Não haveria necessidade de ligar os seis grampos ao ecrã interno, pois os dois grampos que ficam com uma tensão flutuante estão atrás do ecrã, ficando protegidos. Para efeitos de ensaio foi necessário encontrar um dos grampos ligado ao ecrã para fazer a sua ligação à terra. Em anexo encontra-se a ficha técnica do ecrã interno que foi pedido para a construção deste isolador. Este ecrã é feito através de uma malha condutora com as extremidades dobradas para fora, ligado a três grampos intercalados.

Destaca-se que este isolador foi ensaiado no ar depois do seu fabrico sem conector separável, tendo atingido uma tensão de 40 kV, sem ocorrência de DPs. Resultados equivalentes só foram conseguidos com o isolador com grampos curvados e anel, mostrando que o ecrã que envolve o condutor protege a zona interior e exterior dos grampos, que não é protegida de forma completa pelo conector devido ao espaço deixado para a base do isolador.

Como o objectivo será o isolador funcionar com um conector separável foi então feito o seu ensaio. É possível visualizar a montagem do isolador para ensaio na figura 5.13, onde o isolador é alimentado pela zona inferior através de um prato metálico onde é ligado o eléctrodo de alta tensão.

O primeiro ensaio ficou um pouco aquém das expectativas tendo apresentado uma tensão limiar de 14 kV. O mesmo resultado foi obtido no ensaio anterior, em que o isolador estava embebido em silicone líquido. Confirma-se que existe uma melhoria, apesar de pequena, pois este ensaio foi feito em ar ao contrário do anterior. Duvidando dos resultados obtidos e desconfiando que as DPs estavam a ter origem no conector separável, foi feito outro ensaio com outro conector



Figura 5.13: Distribuição do campo eléctrico no isolador com ecrã interno recuado

igual. No segundo ensaio já se obteve uma tensão limiar superior, de 20 kV, como mostrado na tabela 5.6, o que veio confirmar que as DPs detectadas estavam a ter origem no conector.

Tabela 5.6: Medições do ensaio do isolador com ecrã interno recuado e terminal

	Tensão (kV)
Terminal 1: U_{lim}	14
Terminal 2: U_{lim}	20

É de salientar que os dois conectores usados no ensaio não eram novos, o que aumenta a probabilidade de ocorrência de DPs. Para que o conector encaixe no isolador de forma perfeita é necessário usar um fio para retirar todo o ar no interior do terminal. O fio usado já se encontrava um pouco trilhado, o que possa ter danificado o interior do conector após a sua remoção.

Mesmo sem a possibilidade de ensaiar o isolador com um terminal novo, foram obtidos resultados bastante positivos, que já eram esperados após a simulação. Assim sendo, o isolador apresentou-se livre de DPs durante o ensaio até aos 20 kV, estando apenas 4 kV abaixo do valor máximo de tensão recomendado pelo fabricante do terminal, que afirma ser de 24 kV.

5.3 Resumo dos Ensaio

Os valores de tensão limiar obtidos dos vários ensaios efectuados podem ser visualizados na tabela 5.7, facilitando a comparação dos vários valores obtidos.

Tabela 5.7: Valores de tensão limiar obtidos nos vários ensaios

Ensaio	U_{lim} (kV)
Isolador Base	14.2
Isolador com anel condutor	25
Isolador com anel e grampos curvados	40
Isolador com anel, grampos curvados e terminal	10
Isolador com anel, grampos curvados e terminal embebidos em silicone líquido	14
Isolador com ecrã interno recuado e terminal	20

Capítulo 6

Conclusão

Foi feita a análise, por simulação por elementos finitos, do isolador de travessia em estudo. Esta análise confirmou a existência de uma zona critica envolvente aos grampos. Para se aumentar a tensão de limiar, foram gizadas várias (cerca de 10) soluções, as quais foram ensaiadas numericamente por simulação em elementos finitos. Destas, as que se mostraram menos interessantes foram descartadas e não estão descritas neste texto. Foram seleccionadas duas soluções, que foram propostas. Depois de se ter confirmado a existência de outra zona critica foi necessário fazer uma alteração da proposta inicial, adicionando um ecrã interno junto ao condutor de modo a solucionar essas duas zonas.

Tendo a possibilidade de ensaiar os isoladores, foram construídos os modelos suficientes que permitissem mostrar a existência das zonas criticas e as suas respectivas soluções. Os resultados obtidos durante os ensaios foram os esperados em todos os modelos, mostrando pela ordem dos ensaios as fases de melhoramento da estrutura do isolador.

Não foi construído o isolador com ecrã interno junto ao grampos feito na simulação, por ser uma solução idêntica para ensaio ao isolador com grampos curvados e anel condutor.

Por não haver conectores separáveis novos para o ultimo ensaio não foi possível determinar a tensão limiar correcta do modelo final. Mesmo usando conectores que não estavam novos e não usando massa de lubrificação necessária para o encaixe do conector, o valor de tensão limiar de 20 kV foi atingido, sendo bem possível com os requisitos anteriormente referidos chegar aos 24 kV, valor máximo recomendado pelo fabricante para o conector separável. Relativamente aos custos adicionais do isolador com ecrã interno, terá em média um aumento do custo de fabricação entre 10% e 15%, assim como o custo da malha que compõe o ecrã de cerca de 5 euros.

Bibliografia

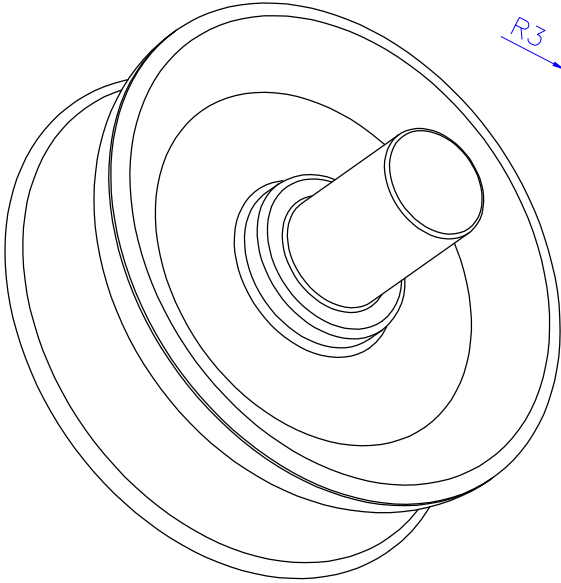
- [1] Ieee recommended practice for the detection of partial discharge and the measurement of apparent charge in dry -type transformers. *IEEE Std.C57 124-1991*, 1992.
- [2] Western Area Power Administration. <http://www.wapa.gov/rm/psmmCHAP-06.pdf>.
- [3] Presco AG. Information. <http://www.prescoag.com/Bilder/pdf/pdcal.pdf>, Dezembro 2005.
- [4] S.A. Boggs. Partial discharge. ii. detection sensitivity. *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, 6(5):35 –42, sept.-oct. 1990.
- [5] S.A. Boggs. Partial discharge. iii. cavity-induced pd in solid dielectrics. *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, 6(6):11 –16, nov.-dec. 1990.
- [6] D.A. Bolon. Epoxy chemistry for electrical insulation. *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, 11(4):10 –18, july-aug. 1995.
- [7] Cedrat. <http://www.cedrat.com>.
- [8] Walter Martin Huamán Cuenca. Caracterização dos sinais de descargas parciais em equipamentos de alta tensão a partir de modelos experimentais. Master’s thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
- [9] Guilherme Cunha da Silva. Descargas parciais estimuladas por raios-x contínuo e pulsado em materiais dielétricos: Similaridades e diferenças. Master’s thesis, Universidade Federal do Paraná, 2005.
- [10] M.G. Danikas. The definitions used for partial discharge phenomena. *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 28(6):1075 –1081, dec 1993.
- [11] J.C. Devins. The 1984 j. b. whitehead memorial lecture the physics of partial discharges in solid dielectrics. *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, EI-19(5):475 –495, oct. 1984.

- [12] J. C. Dissado, L. A; Fothergill. *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. London: Peter Peregrinus Ltd, 1992.
- [13] José Vicente P. Duarte. *Danos à Camada Isolante de Cabos em Redes não Blindadas devido a Distorções do Campo Elétrico na Proximidade de Objetos Aterrados*. Universidade Federal de Minas Gerais.
- [14] Schneider Electric. <http://applications.schneiderelectric.es>.
- [15] Euromold. <http://www.etscc.co.uk/euromold>.
- [16] José Márcio Faier. Curvas principais aplicadas na identificação de descargas parciais em equipamentos de potência. Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- [17] D. FELDMAN and A. BARBALATA. *Synthetic Polymers – Technology , Properties and Applications*. 1.ed. London: Chapman&Hall, 1996.
- [18] B. Fruth and L. Niemeyer. The importance of statistical characteristics of partial discharge data. *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 27(1):60 –69, feb 1992.
- [19] F. Guastavino, A.S. Thelakkadan, G. Coletti, and A. Rato. Electrical tracking in cycloaliphatic epoxy based nano structured composites. In *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2009. CEIDP '09. IEEE Conference on*, pages 701 –704, oct. 2009.
- [20] E. Gulski. Digital analysis of partial discharges. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 2(5):822 –837, oct 1995.
- [21] E. Gulski and F.H. Kreuger. Computer-aided recognition of discharge sources. *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 27(1):82 –92, feb 1992.
- [22] G. Heger, H.J. Vermeulen, J.P. Holtzhausen, and W.L. Vosloo. A comparative study of insulator materials exposed to high voltage ac and dc surface discharges. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 17(2):513 –520, april 2010.
- [23] Elliot Industries. <http://www.elliottindustries.com/pdf/b2100.pdf>.
- [24] F. H. KREUGER. *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment*. Butterworths, London, 1989.
- [25] F.H. Kreuger, E. , and A. Krivda. Classification of partial discharges. *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 28(6):917 –931, dec 1993.

- [26] J.H. Mason. Enhancing the significance of pd measurements. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 2(5):876–888, oct 1995.
- [27] J.M. Meek and J.D. Craggs. *Electrical breakdown of gases*. Wiley, 1978.
- [28] P. Morshuis. Assessment of dielectric degradation by ultrawide-band pd detection. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, 2(5):744–760, oct 1995.
- [29] P. H. F Morshuis. Partial discharge mechanisms. Master’s thesis, Delft University, 1993.
- [30] Domingos Moura. *Técnicas de Alta Tensão*. Tecnica, Lisboa, 1980.
- [31] D.A. Nattrass. Partial discharge measurement and interpretation. *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, 4(3):10–23, may-june 1988.
- [32] Integrated Engineering Software. <http://www.integratedsoft.com>.
- [33] T. Tanaka. Internal partial discharge and material degradation. *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, EI-21(6):899–905, dec. 1986.
- [34] W. Yan, B.T. Phung, Z.J. Han, and K. Ostrikov. Surface insulation performance of epoxy resin/silica nanocomposite material. In *Electrical Insulation Conference (EIC), 2011*, pages 235–239, june 2011.

Anexo A

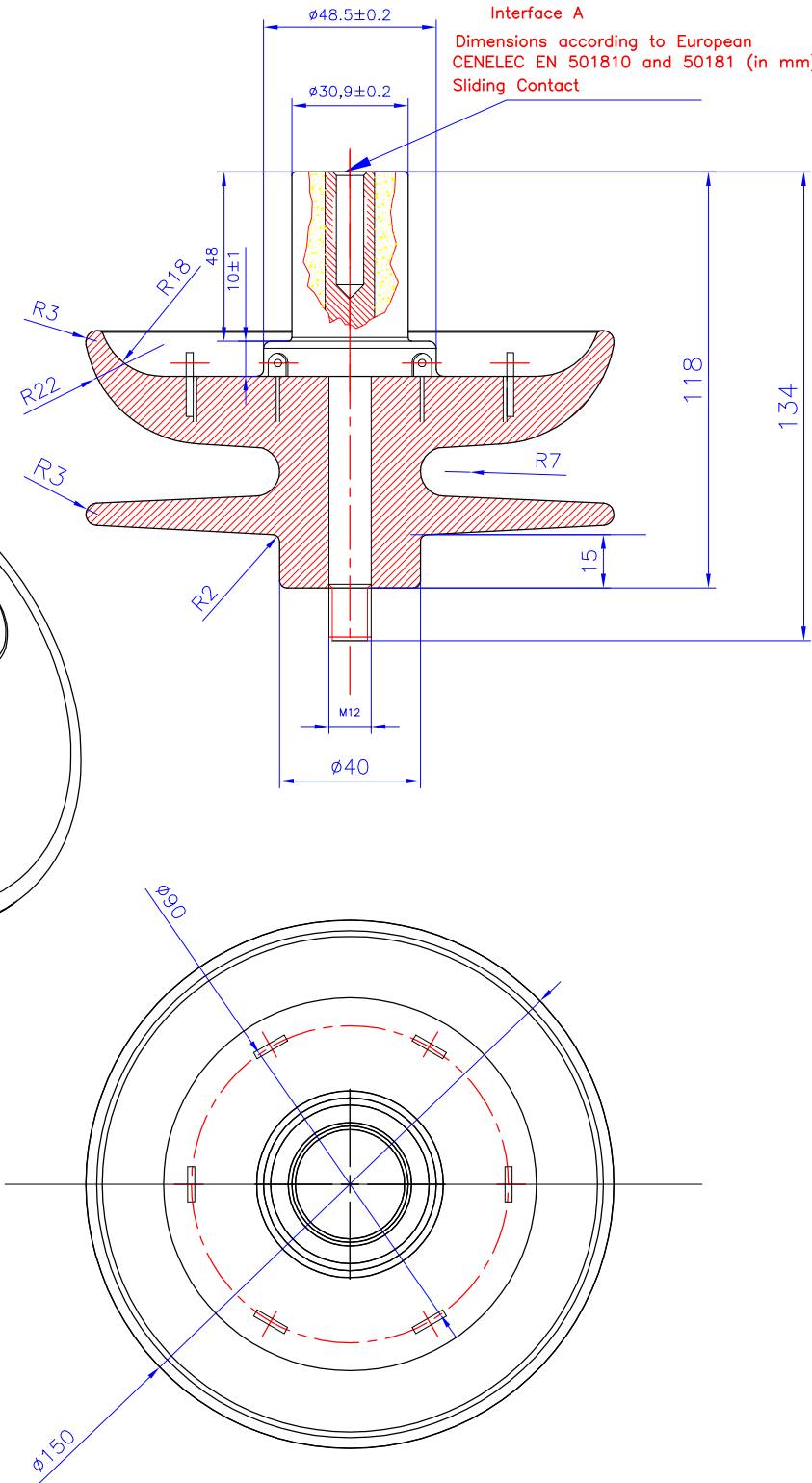
distancia de arco 101mm



linha de fuga 243mm



distancia de arco 142mm



DESENHO ASSISTIDO POR COMPUTADOR - CÓPIA OU REPRODUÇÃO PROIBIDA

MATERIAL: Insulator: Cicloliphatic Resin Inserts:Brass (Ag10µm)	PROJECT								
	DES.	2007/MAR/26							
	COP.								
ACABAMENTO: —	VERIF.								
	ESCALA	Adaptador H60XD150					A4	1007599000	
TRATAMENTO: —	Cotas n/ Toleranc. NP—265								
médio	—								—
						ARQUIVO: —		FOLHA: 1 de 1	
						SUBSTITUI: —			
						SUBSTITUIDO POR: —			

158LR
INTERFACE A
ELBOW CONNECTOR

Up to 24 kV - 250 A

Application

Separable elbow connector designed to connect polymeric insulated cable to equipment (transformers, switch gear, motors...).

Also connects cable to cable, using the appropriate mating part.

Technical characteristics

- The thick conductive EPDM jacket provides a total safe to touch screen which ensures safety for personnel.
- Each separable connector is tested for AC withstand and partial discharge prior to leaving the factory.

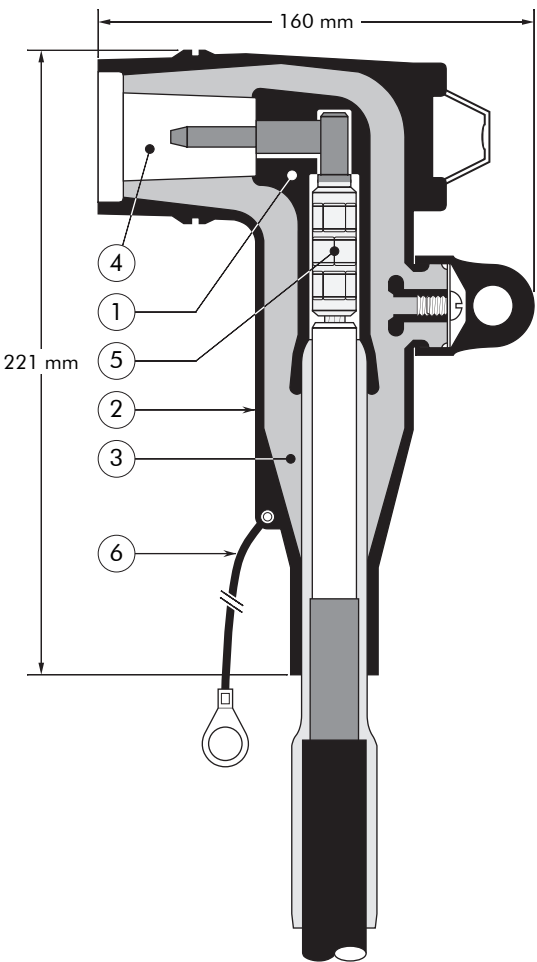
6/10	(12)	kV
6.35/11	(12)	kV
8.7/15	(17.5)	kV
12/20	(24)	kV
12.7/22	(24)	kV

Design

- Separable connector comprising:
1. Conductive EPDM insert.
 2. Conductive EPDM jacket.
 3. Insulating EPDM layer moulded between the insert and the jacket.
 4. Type A - 250 A interface as described by CENELEC EN 50180 and 50181.
 5. Conductor connector.
 6. Earthing lead (-/G version only).

Specifications and standards

The separable connector 158LR meets the requirements of CENELEC HD 629.1.



Separable connector type	Voltage Um (kV)	Current Ir (A)	Conductor sizes (mm ²) (for information only)	
			min.	max.
158LR/G	12	250	16	70
158LR	12	250	70	95
K158LR/G	24	250	16	25
K158LR	24	250	25	95

04/2006

ACCESSORIES INTERFACE A

Application

For use with connectors and bushings with an interface A as described by CENELEC EN 50180 and 50181.

Technical characteristics

All these products, except the earthing plug, are tested for AC withstand and partial discharge prior to leaving the factory.

Up to 24 kV

6/10 (12) kV
6.35/11 (12) kV
8.7/15 (17.5) kV
12/20 (24) kV
12.7/22 (24) kV

150DR Dead-end receptacle

Fits over a bushing with a type A interface to provide 'dead-end' facility.
Renders the assembly watertight.



Ordering instructions

Order
150DR for 12 kV or
K150DR for 24 kV
applications.
The dead-end receptacle can
be supplied with an earth lead.
Order: -/G. E.g. K150DR/G.

150DP Dead-end plug

Plugs into connectors or receptacles to provide 'dead-end' facility.
Renders the assembly watertight

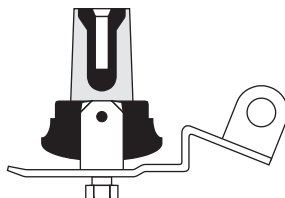


Ordering instructions

Order
150DP for 12 kV or
K150DP for 24 kV
applications.

151SOP Stand-off plug

Is designed to support and 'dead-end' connectors with a type A interface when removed from equipment.

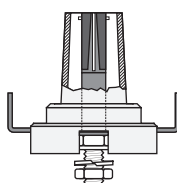


Ordering instructions

Order
151SOP for 12 kV or
K151SOP for 24 kV
applications.

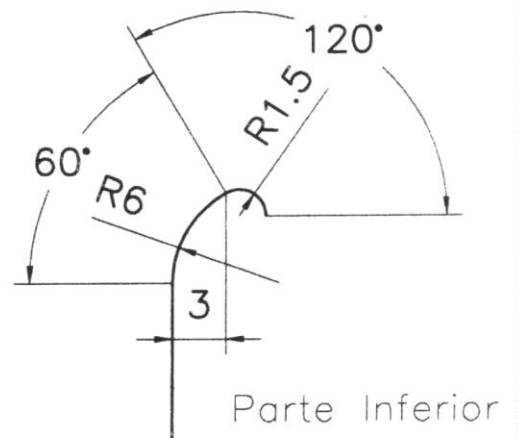
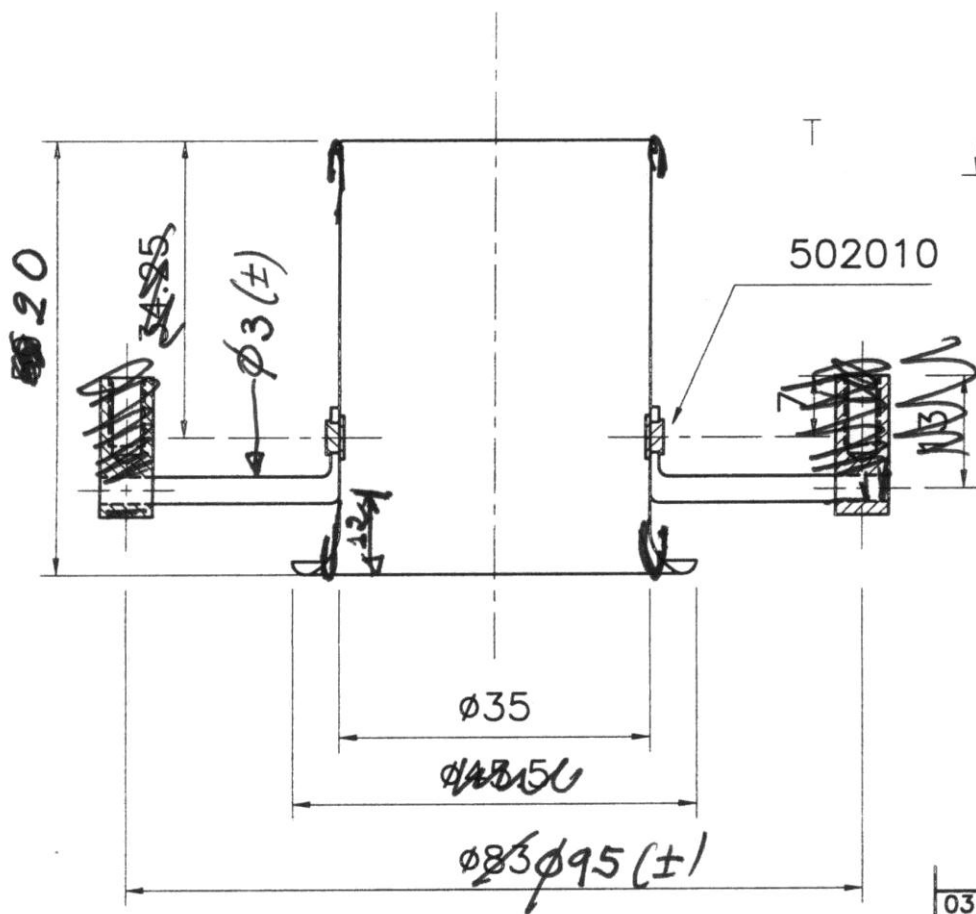
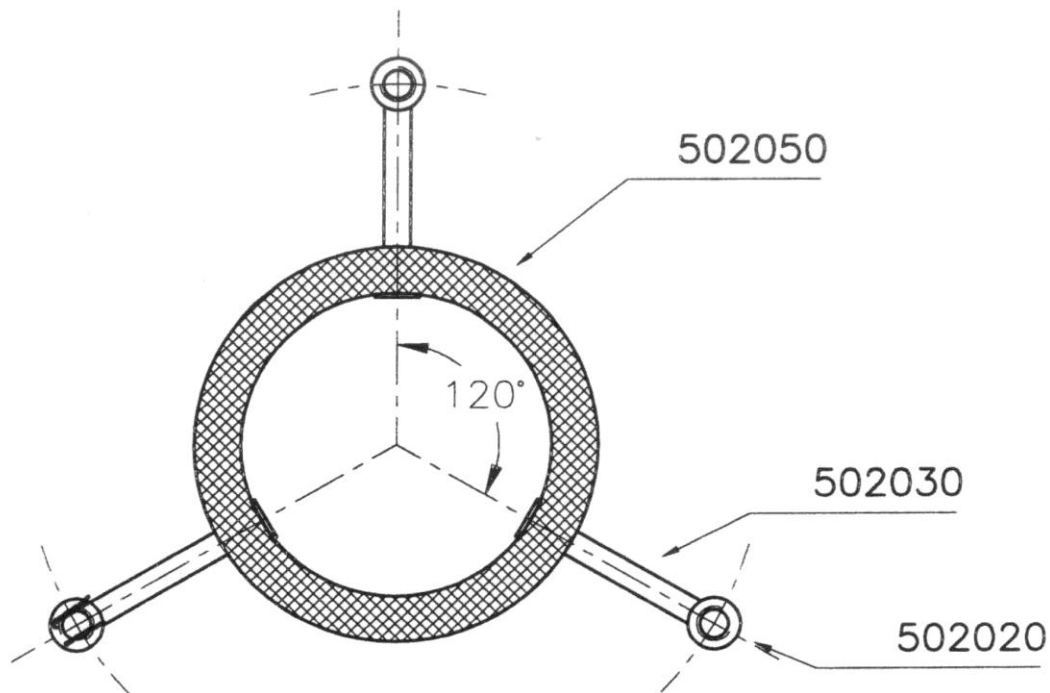
250GP Earthing plug

Is designed to support and earth connectors with a type A interface when removed from equipment.



Ordering instructions

Order
250GP for 12 kV or 24 kV
applications.



TOLERANCIAS GENERALES
NO INDICADAS EN MM.

1-6	-----	±0.20
6-18	-----	±0.25
18-30	-----	±0.40
30-100	-----	±0.60
100-300	-----	±1.00
300-1000	-----	±1.50

ANGULOS ±1°

03		
02		
01	0052	10/4/00
REV.	DESCRIPCION	FECHA
	MODIFICACIONES	